T.C.
TRAKYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI KULLANILARAK BİRLEŞTİRİLEN 5083 ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ MEKANİK VE METALURJİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

KAAN ÖZEL

DOKTORA TEZİ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Cem Secaattin ÇETİNARSLAN

EDİRNE – 2023

KAAN ÖZEL'in hazırladığı "**Sürtünme Karıştırma Kaynağı Kullanılarak Birleştirilen 5083 Alüminyum Alaşımlarının Mekanik ve Metalurjik Özelliklerinin İncelenmesi**" başlıklı tez, tarafımızca okunmuş, kapsam ve niteliği açısından Makina Mühendisliği Anabilim Dalında bir **Doktora tezi** olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri İmza

Prof. Dr. Mümin ŞAHİN

Prof. Dr. Cem Secaattin ÇETİNARSLAN

Doç. Dr. Turgut GÜLMEZ

Doç. Dr. Ümit HÜNER

Dr. Öğr. Üyesi Deniz TAŞKIN

Tez Savunma Tarihi: 18/01/2023

Bu tezin Doktora tezi olarak gerekli şartları sağladığını onaylarım.

İmza

Prof. Dr. Cem Secaattin ÇETİNARSLAN

……

Tez Danışmanı

Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü onayı

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü
Prof. Dr. Hüseyin Rıza Ferhat KARABULUT

T.Ü. FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI DOKTORA PROGRAMI
DOĞRULUK BEYANI

Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında, tüm verilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini, kullanılan verilerde tahrifat yapılmadığını, tezin akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını, kullanılan tüm literatür bilgilerinin bilimsel normlara uygun bir şekilde kaynak gösterilerek ilgili tezde yer aldığını ve bu tezin tamamı ya da herhangi bir bölümünün daha önceden Trakya Üniversitesi ya da farklı bir üniversitede tez çalışması olarak sunulmadığını beyan ederim.

18/01/2023
Kaan ÖZEL
İmza

Doktora Tezi
Sürtünme Karıştırma Kaynağı Kullanılarak Birleştirilen 5083 Alüminyum Alaşımlarının Mekanik ve Metalurjik Özelliklerinin İncelenmesi
T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

ÖZET

Mühendislik uygulamaları içinde önemli bir yer tutan birleştirme yöntemlerinden olan kaynaklı birleştirmeler, teknoloji dünyasındaki gelişmelerden etkilenmiş ve çeşitli alt grupları ortaya çıkmıştır. Bu alt gruplarda yer alan ve katı halde birleştirme yöntemlerinden olan Sürtünme Karıştırma Kaynağı (SKK) yöntemi, birçok avantajı nedeniyle diğer kaynak yöntemleri arasında gittikçe artan bir yere sahip olmaktadır. Bu yöntem, birçok yönden sağladığı üstünlüklerle birleştirilmesi çoğu zaman mümkün olmayan özellikle günümüzde alüminyum alaşımları için yaygın bir biçimde kullanılmaktadır. Ayrıca, magnezyum alaşımları, titanyum alaşımları, bakır alaşımları, kurşun ve bronz için de bu yöntemin uygulaması devam etmektedir.

Bu doktora tezi çalışmasında Sürtünme Karıştırma Kaynağı yöntemi, 5083 alüminyum alaşımlarının birleştirilmesi için uygulanmıştır. 5083 alüminyum alaşımlarının kullanılmasının nedeni, bu alaşımların endüstride yoğun biçimde kullanılması ve ayrıca alüminyum elementi ile birlikte içeriğinde bulunan magnezyum ve manganez elementlerinin farklı kaynak yöntemlerine elverişli olmasıdır.

Çalışmalar için öncelikle, Sürtünme Karıştırma Kaynağı Deney Tezgahı hazırlanmıştır. Sonrasında literatür çalışmalarına uyumlu olacak şekilde tezgah kapasitesi de göz önünde bulundurularak parametreler belirlenmiş ve kaynaklı birleştirmeler gerçekleştirilmiştir.

Mekanik ve metalurjik incelemeler için sürtünme karıştırma kaynağı ile elde edilen kaynaklı birleştirmelerden numuneler hazırlanmıştır. Kaynaklı numuneler ile

çekme dayanımı, yorulma dayanımı, sertlik ile mikroyapı deneyleri ve Statistical Package for Social Sciences (SPSS) analizi gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar literatür çalışmaları ile karşılaştırılmış ve yorumlanmıştır.

Yıl : 2023
Sayfa Sayısı : 175
Anahtar Kelimeler : Sürtünme karıştırma kaynağı, katı hal kaynak yöntemi, 5083 alüminyum alaşımı, çekme dayanımı, sertlik, yorulma dayanımı, mikroyapı

Doctoral Thesis

Investigation on Mechanical and Metallurgical Properties of 5083 Aluminum Alloys Joined by Friction Stir Welding

Trakya University Institute of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

ABSTRACT

Welded joints, one of the most important joining methods in engineering applications, have been influenced by developments in technology world and various subgroups have emerged. Friction Stir Welding method which is one of the solid state joining methods in these subgroups has an increasing place among other welding methods due to many advantages. This method is widely used for aluminum alloys, which are difficult to weld with advantages in many ways. This method's application is still in use for magnesium alloys, titanium alloys, copper alloys, lead and bronze.

In this doctoral thesis study, Friction Stir Welding method was applied for joining 5083 aluminum alloys. The reason for using 5083 aluminum alloys is intensive use of these alloys in industry and also magnesium and manganese elements in the content together with the aluminum element is suitable for different welding methods.

Firstly, Friction Stir Welding Test Workbench was prepared for studies. Afterwards, parameters were determined according to literature studies considering capacity of workbench and welded joints were realized.

Specimens were prepared from the welded joints obtained by friction mixing welding for mechanical and metallurgical investigations. Tensile strength, fatigue strength, hardness and microstructure tests and Statistical Package for Social Sciences (SPSS) analysis were performed with welded specimens and obtained results were compared and interpreted with the literature studies.

Year : 2023

Number of Pages : 175

Anahtar Kelimeler : Friction stir welding, solid state welding method, 5083 aluminum alloys, tensile strength, hardness, fatigue strength, micro structure

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasında sonuna kadar emeği geçen, teknik bilgi birikimini benden esirgemeyen ve akademik hayatta her zaman bana yol gösteren sayın hocam ve danışmanım Prof. Dr. Cem S. ÇETİNARSLAN'a tüm katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Doktora Tez İzleme Komitesi üyeleri çok değerli hocalarım Prof. Dr. Mümin ŞAHİN ve Dr. Öğr. Üyesi Deniz TAŞKIN'a gösterdikleri ilgi ve yönlendirmeleri sebebiyle teşekkür ederim.

Doktora Tez Savunma Sınavı Jüri üyeliğini kabul ederek yorumlarıyla tezime yapıcı katkıda bulunan İstanbul Teknik Üniversitesi Makina Fakültesi Öğretim Üyesi Doç. Dr. Turgut GÜLMEZ ve Kırklareli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Öğretim Üyesi Doç. Dr. Ümit HÜNER hocalarıma teşekkür ederim.

Doktora tezimin hazırlanması sürecinde malzeme, donanım ve araştırma desteğinden faydalandığım Trakya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne (Proje No: TÜBAP-900), Trakya Üniversitesi Teknoloji Araştırma ve Geliştirme Uygulama ve Araştırma Merkezi'ne ve HEMA Endüstri A.Ş. firmasına teşekkür ederim.

Doktora öğrenimi süresince bana her zaman anlayışlı davranan tüm çalışma arkadaşlarıma ve öğrenim hayatım boyunca beni sürekli destekleyen aileme teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET iv
ABSTRACT vi
TEŞEKKÜR viii
İÇİNDEKİLER ix
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ xi
ÇİZELGELER DİZİNİ xiii
ŞEKİLLER DİZİNİ xiv
BÖLÜM 1 1
GİRİŞ 1
BÖLÜM 2 14
GENEL BİLGİLER 14
2.1. Literatür Çalışması 14
2.2. Problem ve Önemi 24
2.3. Bu Çalışmada Amaçlananlar 24
BÖLÜM 3 26
MATERYAL VE METOT 26
3.1. SKK için Hazırlanan Tezgah ve SKK Birleştirmeleri Hakkında Bilgiler 26
3.1.1. SKK için Tezgah ve Takım Hazırlıkları 26
3.1.2. Numune Hazırlama Aşaması 30
3.1.3. SKK Birleştirme Deneyleri 33
3.2. Mekanik ve Metalurjik Deneyler Hakkında Bilgiler 34
3.2.1. Numune Hazırlama Aşaması 35
3.2.2. Mekanik Özelliklerin İncelenmesi 37

3.2.2.1. Çekme Dayanımlarının İncelenmesi 37
3.2.2.2. Yorulma Dayanımlarının İncelenmesi 38
3.2.2.3. Mikro Sertliklerin İncelenmesi 41
3.2.3. Mikroyapıların İncelenmesi 41
3.2.4. Verilerin İstatistiksel Analizi 43
BÖLÜM 4 45
SONUÇLAR 45
4.1. Mekanik Deneylerin Sonuçları 45
4.1.1. Çekme Deneyi Sonuçları 45
4.1.2. Yorulma Deneyi Sonuçları 48
4.1.3. Mikro Sertlik Deneyi Sonuçları 57
4.2. Mikroyapı Deneylerinin Sonuçları 61
4.3. İstatistiksel Analiz Sonuçları 131
BÖLÜM 5 140
TARTIŞMA 140
KAYNAKLAR 146
ÖZGEÇMİŞ 154
TEZ İLE İLGİLİ BİLİMSEL FAALİYETLER 155

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

°	: derece
$\sigma_ç$	: çekme dayanımı
σ_Δ	: gerilme aralığı
σ_g	: gerilme genliği
σ_{max}	: maksimum gerilme
σ_{min}	: minimum gerilme
σ_{ort}	: ortalama gerilme
η	: optimizasyon parametresi
A_0	: ilk kesit alanı
dak	: dakika
dev	: devir
F_{max}	: Maksimum gerilme için uygulanan kuvvet
F_{genlik}	: Gerilme genliği için uygulanan kuvvet
g/cm^3	: yoğunluk
HV	: Vickers Hardness
Hz	: frekans
mm	: milimetre
mm^2	: milimetrekare
MPa	: megapascal
n	: devir sayısı (dev/dak)
N	: çevrim sayısı
N	: Newton
R	: gerilme oranı
V	: ilerleme hızı (mm/dak)
Al	: Alüminyum
Cu	: Bakır

Li	: Lityum
Mg	: Magnezyum
Mn	: Manganez
Si	: Silisyum
Sn	: Kalay
Zn	: Çinko
DYKB	: Dinamik Yeniden Kristalleşmiş Bölge
IEB	: Isıdan Etkilenmiş Bölge
ITAB	: Isının Tesiri Altındaki Bölge
MIG	: Metal Inert Gas
NASA	: National Aeronautics and Space Administration
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
SKK	: Sürtünme Karıştırma Kaynağı
SPSS	: Statistical Package for Social Sciences
TMEB	: Termo Mekanik Etkilenmiş Bölge
TWI	: Kaynak Enstitüsü

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. Alüminyum esaslı döküm alaşımların sınıflandırılması 3
Çizelge 1.2. Alüminyum esaslı dövme alaşımların sınıflandırılması 3
Çizelge 3.1. SKK Optimum Deney Parametreleri 31
Çizelge 4.1. Çekme deneyi sonuçları (V = 40 mm/dak) 45
Çizelge 4.2. Çekme deneyi sonuçları (V = 80 mm/dak) 46
Çizelge 4.3. Esas malzeme yorulma deneyi sonuçları 49
Çizelge 4.4. 550 dev/dak – 40 mm/dak için yorulma deneyi sonuçları 50
Çizelge 4.5. 700 dev/dak – 40 mm/dak için yorulma deneyi sonuçları 51
Çizelge 4.6. 800 dev/dak – 40 mm/dak için yorulma deneyi sonuçları 51
Çizelge 4.7. 1400 dev/dak – 40 mm/dak için yorulma deneyi sonuçları 52
Çizelge 4.8. 550 dev/dak – 80 mm/dak için yorulma deneyi sonuçları 53
Çizelge 4.9. 700 dev/dak – 80 mm/dak için yorulma deneyi sonuçları 54
Çizelge 4.10. 800 dev/dak – 80 mm/dak için yorulma deneyi sonuçları 54
Çizelge 4.11. 1400 dev/dak – 80 mm/dak için yorulma deneyi sonuçları 55
Çizelge 4.12. Mikro sertlik ölçüm değerleri (550 dev/dak – 40 mm/dak) 58
Çizelge 4.13. Mikro sertlik ölçüm değerleri (550 dev/dak – 80 mm/dak) 58
Çizelge 4.14. Mikro sertlik ölçüm değerleri (tüm parametreler) 59

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. SKK ayrıntılı görünüm (Yılmaz, Ünlü, Uzkut & Ertürk, 2016) 8
Şekil 1.2. SKK Temel Kaynak Bölgeleri (Binal, 2006) 9
Şekil 1.3. SKK birleştirme örnekleri: a) alın, b) kenar, c) T alın, d) bindirme 10
Şekil 1.4. SKK boru ve profil birleştirme örnekleri (Binal, 2006) 11
Şekil 1.5. Alüminyum Panellerinin SKK ile birleştirilmesi (Çam, 2003) 11
Şekil 1.6. Space Shuttle External Tank projesi SKK çalışmalarından görüntüler (Çam, 2003) 12
Şekil 1.7. SKK ile birleştirilen bir otomobil jantı (Çam, 2003) 12
Şekil 1.8. SKK ile birleştirilen hızlı tren alüminyum panelleri - Japonya (Çam, 2003) 13
Şekil 3.1. SKK için hazırlanan freze tezgahı 27
Şekil 3.2. SKK için hazırlanan freze tezgahı (yan görünüş) 27
Şekil 3.3. Ön deneylerde kullanılan malzeme bağlama aparatı 28
Şekil 3.4. SKK deneylerinde kullanılan takımlar (talaşlı işleme esnasındaki görünüş) 28
Şekil 3.5. SKK deneylerinde kullanılan takımlar (ısıl işlem öncesi görünüş) 29
Şekil 3.6. SKK deneylerinde kullanılan takımlar (ısıl işlem sonrası görünüş) 29
Şekil 3.7. 5083 alüminyum alaşımı element analizi test raporu 30
Şekil 3.8. SKK deney numuneleri (imalat aşaması) 31
Şekil 3.9. Hazırlık işlemleri ve numune birleştirme işlemi 32
Şekil 3.10. SKK ile birleştirilmiş ön deney numuneleri 32
Şekil 3.11. SKK ile birleştirilmiş numuneler 33
Şekil 3.12. SKK ile birleştirilmiş numuneler 33
Şekil 3.13. SKK ile birleştirilmiş numuneler 34
Şekil 3.14. Çekme deneyi numune boyutları 35
Şekil 3.15. Yorulma deneyi numune boyutları 35

Şekil 3.16. Mikro Sertlik deneyi numune hazırlık aşaması 35
Şekil 3.17. Parlatma işleminde kullanılan METKON Forcipol 1V parlatma cihazı 36
Şekil 3.18. INSTRON 8501 dinamik test makinası 38
Şekil 3.19. Yorulma deneyinde gerilme – zaman eğrisi 39
Şekil 3.20. Tipik bir Wöhler diyagramı örneği 40
Şekil 3.21. Mikro sertlik (HV 0.5) ölçümü makro fotoğrafı 41
Şekil 3.22. Mikroyapı inceleme işleminde kullanılan XJP-6A model metal mikroskobu 42
Şekil 3.23. Mikroyapı inceleme işleminde kullanılan VITEC görüntüleme sistemi 42
Şekil 3.24. Mikroyapı ve EDS inceleme işleminde kullanılan Evo LS10 model elektron mikroskobu 43
Şekil 4.1. Çekme dayanımı – devir sayısı grafiği (V = 40 mm/dak) 46
Şekil 4.2. Çekme dayanımı – devir sayısı grafiği (V = 80 mm/dak) 47
Şekil 4.3. Çekme dayanımı – devir sayısı grafiği (V = 40 mm/dak ve V = 80 mm/dak) 47
Şekil 4.4. Yorulma dayanımı grafiği (Esas malzeme) 50
Şekil 4.5. Maksimum gerilme – çevrim sayısı (σ_{max} – N) grafiği 53
Şekil 4.6. Maksimum gerilme – çevrim sayısı (σ_{max} – N) grafiği 55
Şekil 4.7. Maksimum gerilme – çevrim sayısı (σ_{max} – N) grafiği 56
Şekil 4.8. Mikro sertlik (HV 0.5) – kaynak ekseninden uzaklık (mm) grafiği 59
Şekil 4.9. 550 dev/dak – 40 mm/dak (x10) makro görüntü 61
Şekil 4.10. 550 dev/dak – 40 mm/dak (x250) – DYKB 61
Şekil 4.11. 550 dev/dak – 40 mm/dak (x250) – TMEB 62
Şekil 4.12. 550 dev/dak – 40 mm/dak (x250) – IEB 62
Şekil 4.13. 700 dev/dak – 40 mm/dak (x10) makro görüntü 63
Şekil 4.14. 700 dev/dak – 40 mm/dak (x250) – DYKB 63
Şekil 4.15. 700 dev/dak – 40 mm/dak (x250) – TMEB 64
Şekil 4.16. 700 dev/dak – 40 mm/dak (x250) – IEB 64
Şekil 4.17. 800 dev/dak – 40 mm/dak (x10) makro görüntü 65
Şekil 4.18. 800 dev/dak – 40 mm/dak (x250) – DYKB 65

Şekil 4.19. 800 dev/dak – 40 mm/dak (x250) – TMEB 66
Şekil 4.20. 800 dev/dak – 40 mm/dak (x250) – IEB 66
Şekil 4.21. 1400 dev/dak – 40 mm/dak (x10) makro görüntü 67
Şekil 4.22. 1400 dev/dak – 40 mm/dak (x250) – DYKB 67
Şekil 4.23. 1400 dev/dak – 40 mm/dak (x250) – TMEB 68
Şekil 4.24. 1400 dev/dak – 40 mm/dak (x250) – IEB 68
Şekil 4.25. 550 dev/dak – 80 mm/dak (x10) makro görüntü 69
Şekil 4.26. 550 dev/dak – 80 mm/dak (x250) – DYKB 69
Şekil 4.27. 550 dev/dak – 80 mm/dak (x250) – TMEB 70
Şekil 4.28. 550 dev/dak – 80 mm/dak (x250) – IEB 70
Şekil 4.29. 700 dev/dak – 80 mm/dak (x10) makro görüntü 71
Şekil 4.30. 700 dev/dak – 80 mm/dak (x250) – DYKB 71
Şekil 4.31. 700 dev/dak – 80 mm/dak (x250) – TMEB 72
Şekil 4.32. 700 dev/dak – 80 mm/dak (x250) – IEB 72
Şekil 4.33. 800 dev/dak – 80 mm/dak (x10) makro görüntü 73
Şekil 4.34. 800 dev/dak – 80 mm/dak (x250) – DYKB 73
Şekil 4.35. 800 dev/dak – 80 mm/dak (x250) – TMEB 74
Şekil 4.36. 800 dev/dak – 80 mm/dak (x250) – IEB 74
Şekil 4.37. 1400 dev/dak – 80 mm/dak (x10) makro görüntü 75
Şekil 4.38. 1400 dev/dak – 80 mm/dak (x250) – DYKB 75
Şekil 4.39. 1400 dev/dak – 80 mm/dak (x250) – TMEB 76
Şekil 4.40. 1400 dev/dak – 80 mm/dak (x250) – IEB 76
Şekil 4.41. 550 dev/dak – 40 mm/dak (x50) – DYKB 77
Şekil 4.42. 550 dev/dak – 40 mm/dak (x500) – DYKB 77
Şekil 4.43. 550 dev/dak – 40 mm/dak (x50) – TMEB 78
Şekil 4.44. 550 dev/dak – 40 mm/dak (x500) – TMEB 78
Şekil 4.45. 550 dev/dak – 40 mm/dak (x50) – IEB 79
Şekil 4.46. 550 dev/dak – 40 mm/dak (x500) – IEB 79
Şekil 4.47. 700 dev/dak – 40 mm/dak (x50) – DYKB 80
Şekil 4.48. 700 dev/dak – 40 mm/dak (x500) – DYKB 80
Şekil 4.49. 700 dev/dak – 40 mm/dak (x50) – TMEB 81
Şekil 4.50. 700 dev/dak – 40 mm/dak (x500) – TMEB 81

Şekil 4.51. 700 dev/dak – 40 mm/dak (x50) – IEB 82
Şekil 4.52. 700 dev/dak – 40 mm/dak (x500) – IEB 82
Şekil 4.53. 800 dev/dak – 40 mm/dak (x50) – DYKB 83
Şekil 4.54. 800 dev/dak – 40 mm/dak (x500) – DYKB 83
Şekil 4.55. 800 dev/dak – 40 mm/dak (x50) – TMEB 84
Şekil 4.56. 800 dev/dak – 40 mm/dak (x500) – TMEB 84
Şekil 4.57. 800 dev/dak – 40 mm/dak (x50) – IEB 85
Şekil 4.58. 800 dev/dak – 40 mm/dak (x500) – IEB 85
Şekil 4.59. 1400 dev/dak – 40 mm/dak (x50) – DYKB 86
Şekil 4.60. 1400 dev/dak – 40 mm/dak (x500) – DYKB 86
Şekil 4.61. 1400 dev/dak – 40 mm/dak (x50) – TMEB 87
Şekil 4.62. 1400 dev/dak – 40 mm/dak (x500) – TMEB 87
Şekil 4.63. 1400 dev/dak – 40 mm/dak (x50) – IEB 88
Şekil 4.64. 1400 dev/dak – 40 mm/dak (x500) – IEB 88
Şekil 4.65. 550 dev/dak – 80 mm/dak (x50) – DYKB 89
Şekil 4.66. 550 dev/dak – 80 mm/dak (x500) – DYKB 89
Şekil 4.67. 550 dev/dak – 80 mm/dak (x50) – TMEB 90
Şekil 4.68. 550 dev/dak – 80 mm/dak (x500) – TMEB 90
Şekil 4.69. 550 dev/dak – 80 mm/dak (x50) – IEB 91
Şekil 4.70. 550 dev/dak – 80 mm/dak (x500) – IEB 91
Şekil 4.71. 700 dev/dak – 80 mm/dak (x50) – DYKB 92
Şekil 4.72. 700 dev/dak – 80 mm/dak (x500) – DYKB 92
Şekil 4.73. 700 dev/dak – 80 mm/dak (x50) – TMEB 93
Şekil 4.74. 700 dev/dak – 80 mm/dak (x500) – TMEB 93
Şekil 4.75. 700 dev/dak – 80 mm/dak (x50) – IEB 94
Şekil 4.76. 700 dev/dak – 80 mm/dak (x500) – IEB 94
Şekil 4.77. 800 dev/dak – 80 mm/dak (x50) – DYKB 95
Şekil 4.78. 800 dev/dak – 80 mm/dak (x500) – DYKB 95
Şekil 4.79. 800 dev/dak – 80 mm/dak (x50) – TMEB 96
Şekil 4.80. 800 dev/dak – 80 mm/dak (x500) – TMEB 96
Şekil 4.81. 800 dev/dak – 80 mm/dak (x50) – IEB 97
Şekil 4.82. 800 dev/dak – 80 mm/dak (x500) – IEB 97

Şekil 4.83. 1400 dev/dak – 80 mm/dak (x50) – DYKB 98
Şekil 4.84. 1400 dev/dak – 80 mm/dak (x500) – DYKB 98
Şekil 4.85. 1400 dev/dak – 80 mm/dak (x50) – TMEB 99
Şekil 4.86. 1400 dev/dak – 80 mm/dak (x500) – TMEB 99
Şekil 4.87. 1400 dev/dak – 80 mm/dak (x50) – IEB 100
Şekil 4.88. 1400 dev/dak – 80 mm/dak (x500) – IEB 100
Şekil 4.89. 550 dev/dak – 40 mm/dak (x500) – DYKB 101
Şekil 4.90. 550 dev/dak – 40 mm/dak (x500) – TMEB 102
Şekil 4.91. 550 dev/dak – 40 mm/dak (x500) – IEB 102
Şekil 4.92. 550 dev/dak – 40 mm/dak (x2500) – DYKB 103
Şekil 4.93. 550 dev/dak – 40 mm/dak (x2500) – TMEB 103
Şekil 4.94. 550 dev/dak – 40 mm/dak (x2500) – IEB 104
Şekil 4.95. 700 dev/dak – 40 mm/dak (x500) – DYKB 104
Şekil 4.96. 700 dev/dak – 40 mm/dak (x500) – TMEB 105
Şekil 4.97. 700 dev/dak – 40 mm/dak (x500) – IEB 105
Şekil 4.98. 700 dev/dak – 40 mm/dak (x2500) – DYKB 106
Şekil 4.99. 700 dev/dak – 40 mm/dak (x2500) – TMEB 106
Şekil 4.100. 700 dev/dak – 40 mm/dak (x2500) – IEB 107
Şekil 4.101. 800 dev/dak – 40 mm/dak (x500) – DYKB 107
Şekil 4.102. 800 dev/dak – 40 mm/dak (x500) – TMEB 108
Şekil 4.103. 800 dev/dak – 40 mm/dak (x500) – IEB 108
Şekil 4.104. 800 dev/dak – 40 mm/dak (x2500) – DYKB 109
Şekil 4.105. 800 dev/dak – 40 mm/dak (x2500) – TMEB 109
Şekil 4.106. 800 dev/dak – 40 mm/dak (x2500) – IEB 110
Şekil 4.107. 1400 dev/dak – 40 mm/dak (x500) – DYKB 110
Şekil 4.108. 1400 dev/dak – 40 mm/dak (x500) – TMEB 111
Şekil 4.109. 1400 dev/dak – 40 mm/dak (x500) – IEB 111
Şekil 4.110. 800 dev/dak – 40 mm/dak (x2500) – DYKB 112
Şekil 4.111. 800 dev/dak – 40 mm/dak (x2500) – TMEB 112
Şekil 4.112. 800 dev/dak – 40 mm/dak (x2500) – IEB 113
Şekil 4.113. 550 dev/dak – 80 mm/dak (x500) – DYKB 113
Şekil 4.114. 550 dev/dak – 80 mm/dak (x500) – TMEB 114

Şekil 4.115. 550 dev/dak – 80 mm/dak (x500) – IEB 114
Şekil 4.116. 550 dev/dak – 80 mm/dak (x2500) – DYKB 115
Şekil 4.117. 550 dev/dak – 80 mm/dak (x2500) – TMEB 115
Şekil 4.118. 550 dev/dak – 80 mm/dak (x2500) – IEB 116
Şekil 4.119. 700 dev/dak – 80 mm/dak (x500) – DYKB 116
Şekil 4.120. 700 dev/dak – 80 mm/dak (x500) – TMEB 117
Şekil 4.121. 700 dev/dak – 80 mm/dak (x500) – IEB 117
Şekil 4.122. 700 dev/dak – 80 mm/dak (x2500) – DYKB 118
Şekil 4.123. 700 dev/dak – 80 mm/dak (x2500) – TMEB 118
Şekil 4.124. 700 dev/dak – 80 mm/dak (x2500) – IEB 119
Şekil 4.125. 800 dev/dak – 80 mm/dak (x500) – DYKB 119
Şekil 4.126. 800 dev/dak – 80 mm/dak (x500) – TMEB 120
Şekil 4.127. 800 dev/dak – 80 mm/dak (x500) – IEB 120
Şekil 4.128. 800 dev/dak – 80 mm/dak (x2500) – DYKB 121
Şekil 4.129. 800 dev/dak – 80 mm/dak (x2500) – TMEB 121
Şekil 4.130. 800 dev/dak – 80 mm/dak (x2500) – IEB 122
Şekil 4.131. 1400 dev/dak – 80 mm/dak (x500) – DYKB 122
Şekil 4.132. 1400 dev/dak – 80 mm/dak (x500) – TMEB 123
Şekil 4.133. 1400 dev/dak – 80 mm/dak (x500) – IEB 123
Şekil 4.134. 1400 dev/dak – 80 mm/dak (x2500) – DYKB 124
Şekil 4.135. 1400 dev/dak – 80 mm/dak (x2500) – TMEB 124
Şekil 4.136. 1400 dev/dak – 80 mm/dak (x2500) – IEB 125
Şekil 4.137. 550 dev/dak – 40 mm/dak (x100) – DYKB / EDX analizi görüntüsü 125
Şekil 4.138. 550 dev/dak – 40 mm/dak (x100) – DYKB / EDX analizi grafiği 126
Şekil 4.139. 550 dev/dak – 40 mm/dak (x100) – DYKB / EDX analizi değerleri 126
Şekil 4.140. 550 dev/dak – 40 mm/dak (x100) – DYKB / EDX analizi BSD görüntüsü 127
Şekil 4.141. 550 dev/dak – 40 mm/dak (x100) – DYKB / EDX analizi Al görüntüsü 127
Şekil 4.142. 550 dev/dak – 40 mm/dak (x100) – DYKB / EDX analizi C görüntüsü 128

Şekil 4.143. 550 dev/dak – 40 mm/dak (x100) – DYKB / EDX analizi Mg görüntüsü 128
Şekil 4.144. 550 dev/dak – 40 mm/dak (x100) – DYKB / EDX analizi O görüntüsü 129
Şekil 4.145. 550 dev/dak – 40 mm/dak (x100) – DYKB / EDX analizi Mn görüntüsü 129
Şekil 4.146. 550 dev/dak – 40 mm/dak (x100) – DYKB / EDX analizi Ag görüntüsü 130
Şekil 4.147. 550 dev/dak – 40 mm/dak (x100) – DYKB / EDX analizi Si görüntüsü 130
Şekil 4.148. SPSS'te regresyon analizi için kullanılan çekme deneyleri veri girişi örneği 131
Şekil 4.149. SPSS'te regresyon analizi için kullanılan yorulma deneyleri veri girişi örneği 132
Şekil 4.150. SPSS'te regresyon analizi için kullanılan sertlik deneyleri veri giriş örneği 132
Şekil 4.151. SPSS'te çekme deneyleri regresyon analizi sonucu - 1 134
Şekil 4.152. SPSS'te çekme deneyleri regresyon analizi sonucu - 2 135
Şekil 4.153. SPSS'te yorulma deneyleri regresyon analizi sonucu - 1 136
Şekil 4.154. SPSS'te yorulma deneyleri regresyon analizi sonucu - 2 136
Şekil 4.155. SPSS'te yorulma deneyleri regresyon analizi sonucu - 3 137
Şekil 4.156. SPSS'te sertlik deneyleri regresyon analizi sonucu - 1 138
Şekil 4.157. SPSS'te sertlik deneyleri regresyon analizi sonucu - 2 138
Şekil 4.158. SPSS'te sertlik deneyleri regresyon analizi sonucu - 3 139

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Alüminyum ve alaşımlarının endüstride kullanımı, çelik, kurşun ve çinkoya göre daha geç başlamıştır. Endüstrideki hızlı gelişim ve dayanım özellikleri daha iyi olan malzemelere ihtiyaç, alüminyum kullanımının çelikten sonraki sıraya gelmesini sağlamıştır. Alüminyumun endüstrideki hızlı büyümesi ve yerini genişletmesi, bu demir dışı metalin çeşitli birleşimlere uygunluğu ve çok yönlü kullanılabilmesi sebebiyledir. Alüminyum, çeliğe göre oldukça hafiftir, iyi elektriksel iletkenliğe ve iyi ısıl iletkenliğe sahiptir. Korozyon direnci diğer metallere göre oldukça iyidir. Alüminyum, kolaylıkla dökülebilir ve plastik şekil verilebilir bir metal olup pek çok farklı geometride iyi yüzey kalitesi vermektedir. Düşük ergime derecesi ve kolaylıkla geri dönüşümü sayesinde diğer metallere göre daha az enerji tüketilerek işlenebilen bir metaldir. Alüminyum bu üstün özellikleri sayesinde önemli ve iyi bir mühendislik malzemesidir.

Bilindiği gibi alüminyum yoğunluğu, çelik yoğunluğunun yaklaşık üçte biri kadardır (Alüminyum - 2,70 g/cm^3, Çelik - 7,83 g/cm^3). Dayanımı, çelik malzemelere göre daha düşük olmasına rağmen kesit artışı ile eş değer dayanım sağlanabilmektedir (Askeland, 1998).

Uygun tasarımlar ile çelik yapılar yerine alüminyum kullanımı sayesinde % 50'den fazla hafiflik sağlanmaktadır.

En yoğun alüminyum kullanımının özellikle taşımacılık (otomobiller, gemiler, uçaklar vb.) sektöründe olduğu bilinmektedir. Bunu, inşaat ve ambalaj sektörü takip etmektedir. Üstün özellikleri sayesinde, örneğin otomobillerde motor, vites, aktarma sistemleri, levhalar ve profiller, soğutma sistemleri vb. parçalarda kullanılmaktadır (Zeytin, 2000).

Dövme ve döküm alüminyum alaşımları, korozyona karşı dayanıklılık ve hafiflik kazandırması sebebiyle taşıtlarda kullanılmaktadır. Taşıtlar ne kadar hafif olursa o kadar az enerjiye ihtiyaç duyarlar. Ağırlığın azalması ile birlikte yakıt tüketimi azalmakta, yük kapasitesi artmaktadır. Elde edilen verilere göre önemli ölçüde enerji tasarrufu sağlanmaktadır. Bir uçak ağırlığının yaklaşık % 70'i alüminyum malzemelerden oluşmaktadır. Alüminyum alaşımlarındaki hafifliğin yanı sıra dayanımların yüksek olması da havacılık sektörünün gelişmesinde önemli bir rol oynamıştır. İlaveten, yüksek korozyon dirençleri sayesinde denizcilik sektöründe alüminyum kullanımı yıllar içerisinde artmıştır (Doğan, 2006).

Alüminyum alaşımları yorulma altında genel olarak belirli bir dayanım sınırı göstermemekte ve kırılma düşük gerilme seviyelerinde meydana gelmektedir. İlaveten, alüminyum alaşımlarının ergime sıcaklıklarının diğer alaşımlara göre düşük olmasından dolayı, yüksek sıcaklıktaki performansları daha azdır. Ayrıca, sahip oldukları düşük sertlik değerleri sebebiyle düşük aşınma dirençlerine sahiptir (Askeland, 1998).

Alüminyum elementi, bileşik yapmış halde yer kabuğunun yaklaşık % 8'ini oluşturmaktadır. Alüminyum, demir esaslı malzeme olan çelikten sonra en fazla kullanılan demir dışı metal olarak bilinmektedir, ateşe karşı dayanımlı anlamına gelen ALUM kelimesinden türetilmiştir. Alüminyum alaşımları, 1900'lü yılların başlarında endüstriyel olarak üretilmeye başlanmıştır. 1910 yılında dünyadaki alüminyum alaşımı üretim miktarı 17.000 ton civarlarında iken 1980'li yıllarda 16.000.000 ton civarlarına yükselmiştir. Geri dönüşüm oranı diğer metallere göre çok daha yüksektir.

Alüminyum (Al) alaşımlarının fiziksel ve kimyasal özellikleri, mikroyapılar ve alaşım elementlerine bağlı olarak değişmektedir. Bakır (Cu), manganez (Mn), silisyum (Si), magnezyum (Mg), çinko (Zn) ve kalay (Sn), alüminyuma katılan önemli alaşım elementleridir. Alaşımlar, dövme alaşımlar ve döküm alaşımlar olmak üzere iki alt gruba ayrılmaktadır. Dövme alaşımlar, plastik deformasyon yöntemleriyle şekillendirilmekte ve döküm alaşımlara göre değişik bileşimlere ve mikroyapılara sahip olmaktadır. Bu alaşımlar da ısıl işlem uygulanabilir ve ısıl işlem uygulanamaz olmak üzere iki alt gruba ayrılabilir. Isıl işlem uygulanabilir olanlara yaşlandırma sertleşmesi uygulanabilirken ısıl işlem uygulanamaz olanlar, katı eriyik şeklinde sertleşme, pekleşme sertleşmesi ve dispersiyon sertleşmesi ile sertleştirilebilir.

Dövme alaşımlar, dörtlü bir sistem ile gösterilmektedir. İlk basamak alaşım grubunu göstermektedir. Döküm alaşımlar ise genellikle üç basamaklı bir sistem ile gösterilmektedir (Smith, 2001). Aşağıdaki çizelgelerde detaylar verilmiştir.

Çizelge 1.1. Alüminyum esaslı döküm alaşımların sınıflandırılması

Gösterim	**Element İçeriği**	**Yaşlandırma Durumu**
1XX.X	Ticari saflıkta Al (> %99 Al)	Yaşlandırılamaz
2XX.X	Al-Cu	Yaşlandırılabilir
3XX.X	Al-Si + Mg / Cu	Biraz yaşlandırılabilir
4XX.X	Al-Si	Yaşlandırılamaz
5XX.X	Al-Mg	Yaşlandırılamaz
6XX.X	Kullanımda değil	-
7XX.X	Al-Zn	Yaşlandırılabilir
8XX.X	Al-Sn	Yaşlandırılabilir
9XX.X	Gelecekte kullanılmak üzere	-

Çizelge 1.2. Alüminyum esaslı dövme alaşımların sınıflandırılması

Gösterim	**Element İçeriği**	**Yaşlandırma Durumu**
1XXX	Ticari saflıkta Al (> %99 Al)	Yaşlandırılamaz
2XXX	Al-Cu	Yaşlandırılabilir
3XXX	Al-Mn	Yaşlandırılamaz
4XXX	Al-Si	Yaşlandırılamaz
5XXX	Al-Mg	Yaşlandırılamaz
6XXX	Al-Mg-Si	Yaşlandırılabilir
7XXX	Al-Zn	Yaşlandırılabilir
8XXX	Al-Li	Yaşlandırılabilir
9XXX	Gelecekte kullanılmak üzere	-

1XXX, 3XXX, 4XXX ve 5XXX serisi dövme alaşımlara ısıl işlem uygulanamaz. Bu serilerdeki alaşımlar sadece şekil değiştirme yoluyla sertleştirilebilir.

2XXX, 6XXX, 7XXX ve 8XXX serisi alaşımlar ısıl işlem yoluyla sertleştirilebilir.

Alüminyum alaşımlarına uygulanan ısıl işlemler çeşitli şekillerde uygulanabilir. Temel temperleme durumlarına ait detaylar aşağıda gösterilmektedir (Smith, 2001).

F: üretildiği gibi, pekleşme kontrolü yok

O: tavlanmış, yeniden kristalleşmiş

H: pekleştirilmiş (sertleştirilmiş)

T: ısıl işlem uygulanmış

Pekleştirilmiş alt bölümler:

H1X: Sadece soğuk şekillendirilmiş (X soğuk şekillendirme miktarına ve mukavemetlendirmeye işaret eder).

H12: Soğuk şekillendirme, O ve H14 temperleri arasında ortalarda bir çekme dayanımı sağlar.

H14: Soğuk şekillendirme, O ve H18 temperleri arasında bir çekme dayanımı sağlar.

H16: Soğuk şekillendirme, H14 ve H18 temperleri arasında ortalarda bir çekme dayanımı sağlar.

H18: Soğuk şekillendirme, yaklaşık % 75 azalma sağlar.

H19: Soğuk şekillendirme, H18 temperleme ile elde edilen çekme dayanımından daha fazla dayanım sağlar.

H2X: Soğuk şekillendirilmiş ve kısmen tavlanmış.

H3X: Düşük sıcaklıkta yapının yaslanmasını önlemek için soğuk şekillendirilmiş ve dengelenmiş (Askeland, 1998).

Isıl işlem uygulanmış alt bölümler:

W: Çözündürme uygulanmış.

T: Yaşlandırılmış.

T1: Sıcak şekillendirme sonrası soğutulmuş ve doğal yaşlandırılmış.

T2: Sıcak şekillendirme sonrası soğutulmuş, soğuk şekillendirilmiş ve doğal yaşlandırılmış.

T3: Çözeltiye alma uygulanmış, soğuk şekillendirilmiş ve doğal yaşlandırılmış.

T4: Çözeltiye alma uygulanmış ve doğal yaşlandırılmış.

T5: Sıcak şekillendirme sonrası soğutulmuş ve yapay yaşlandırılmış.

T6: Çözeltiye alma uygulanmış ve yapay yaşlandırılmış.

T7: Çözeltiye alma uygulanmış, aşırı yaşlandırmış.

T8: Çözeltiye alma uygulanmış, soğuk şekillendirilmiş ve yapay yaşlandırılmış.

T9: Çözeltiye alma uygulanmış, yapay yaşlandırılmış ve soğuk şekillendirilmiş.

T10: Sıcak şekillendirme sonrası soğutulmuş, soğuk şekillendirilmiş ve yapay yaşlandırılmış (Smith, 2001).

Doğal Yaşlandırma:

Alüminyum alaşımlarının standart oda sıcaklığında bekletilmesi suretiyle katı çözelti içerisindeki alaşım elementlerinin çözeltiden ayrılması ve çökelerek sertleşmesi vasıtasıyla sertliğin arttırılmasıdır.

Yapay Yaşlandırma:

Pencere ve cephe sistemlerinde kullanılmakta olan alüminyum alaşımından üretilmiş olan profillerin, ekstrüzyon işlemi sonrası 180 ^{o}C sıcaklıkta belirli sürelerle ısıl işlem fırınlarında bekletilmesidir. Doğal yaşlandırma işlemine göre daha yüksek sertlik değerleri elde edilebilir.

Metalik malzemeler için kaynak işlemi genel bir ifadeyle, iki metal malzemenin ısı ve/veya basınç etkisi altında, ilave metal kullanarak/kullanmadan, gerekli metalurjik şartlar altında çözülemez bir şekilde birleştirilmesi olarak tanımlanmaktadır. Birleşme için fiziksel olarak ısı ve basınç bir arada kullanılabildiği gibi basınç olmadan yüksek sıcaklık ya da sıcaklık olmadan basınç da çeşitli kaynak yöntemlerinde kullanılmaktadır.

Günümüze kadar birbirinden çok farklı kaynak yöntemleri geliştirilmiş ve halen çok çeşitli tasarımların birleştirilmesinde kullanılmaya devam etmektedir.

İki metal arasında yüksek kaliteli ve düzgün yapıya sahip olan bir kaynaklı birleştirme gerçekleştirebilmek için öncelikle birleştirilecek olan metallerin atomları

arasında yeterli derecede yakınlaşma olması gerekmektedir. Bu durum da ancak yeterli derecede ısı ve/veya basınç etkisi oluşturulması ve metalurjik olarak bağların oluşması ile gerçekleşebilmektedir. Kaynak işleminde metaller arası bağları oluşturabilmek için öncelikle aşağıdaki şartlar sağlanmalıdır;

- Düzgün veya dalgasız olan yüzeyler
- Yağ, kir ve oksitlerden arındırılmış yüzeyler
- Birleştirilecek olan malzemelerde safsızlık elementlerinin bulunmaması
- Her iki metalin de benzer kristalografik yapıya sahip olması

Tüm bu şartları sağlamak her zaman mümkün değildir ancak çeşitli olumsuz durumların giderilmesi ile birlikte çok çeşitli kaynak yöntemleri geliştirilmiştir. (Karamış, 2012).

Farklı kaynak işlemleri sadece uygulama açısından çeşitlilikler göstermeyip işlem öncesi ön hazırlık gerekliliği açısından farklılık gösterebilirler.

Yüksek sıcaklık uygulanan yöntemlerde metallerin çoğu çevre atmosfer şartlarından kolaylıkla etkilenebilir. Kaynak edilen metallerin metalurjik yapısı da doğal olarak etkilenebilir. Sonuç olarak iyi bir birleştirme elde edebilmek için, öncelikle yeterli miktarda ısı ve/veya basınç membaına, ön hazırlıklara, çevre atmosfer şartlarından koruma imkanlarına ihtiyaç duyulmaktadır.

Sürtünme Karıştırma Kaynağı (SKK), kaynaklı birleştirme yöntemlerinden olan bir katı hal kaynaklı birleştirme yöntemi olup sıvı hal kaynaklı birleştirme yöntemlerine göre, katı metalin ergitilmesi ve tekrar katılaşması esnasında meydana gelen çatlaklar, çarpılmalar ve kalıntı gerilmeleri ortadan kaldırmak amacıyla ilk olarak 1991 yılında, İngiltere'deki Kaynak Enstitüsü (TWI)'nde Wayne M. Thomas ve arkadaşları tarafından alüminyum malzemelerin kaynakları için geliştirilmiştir (Thomas, Nicholas, Needham, Murch, Temple-Smith & Dawes, 1991) ve (Nicholas, 1991). Yaklaşık 30 yıllık süreçte oldukça hızlı ilerlemeler kaydetmekte ve geleceğin kaynak uygulamaları için önem arz edeceği öngörülmektedir.

SKK'nın en önemli avantajları; düşük yüzey hazırlama süresine sahip olması, kısa kaynak süreleri, otomasyona uygun olması ve kaynak parametrelerinin kolaylıkla kontrol edilebilmesi, maliyetlerin düşük olması, kaynak sonrası daha az çarpılma ve kalıntı meydana gelmesi, sıvı hal kaynak yöntemlerine göre daha iyi mekanik özelliklere sahip olması, alüminyum malzemelere ilaveten demir esaslı ve demir dışı metallere kolaylıkla

uygulanabilmesi ile beraberinde malzeme ve enerji tasarrufunu getirmesidir. Kaynaklı birleştirmede ortaya çıkan düşük ısı girdisi sebebiyle intermetalik bileşikler azaltılmakta, sıvı hal kaynak yöntemlerinde karşılaşılan problemlerin en az seviyeye indirgenmesi ile yüksek dayanımlı birleştirmeler gerçekleştirilebilmektedir.

Bu yöntem, daha öncelere dayanan sürtünme kaynağı yönteminin geliştirilen bir şekli olup birbirinin aynı veya farklı malzemelerin kaynak edilmesi, Isı Tesiri Altındaki Bölge (ITAB) ve Birleştirme Bölgesi'nin istenilen biçimde kontrolü, koruyucu atmosfere ihtiyaç duyulmaması ve gaz salınımının olmaması da SKK yöntemini diğer birleştirme yöntemlerinden üstün kılan özelliklerdendir.

SKK'nın genel olarak uygulanma şekli; ergimeyen bir malzemeden üretilmiş pim ve omuz kısımlarından meydana gelen özel geometriye sahip karıştırıcı bir takımın yüksek devirde kendi ekseni etrafında dönerek birleştirilecek olan malzemelerin kenarlarına temas ederek belirli bir hızda kaynak ekseni boyunca ilerleyerek hareket etmesidir.

SKK yöntemi ile alın, köşe, bindirme ve T kaynağı gibi farklı pozisyonlarda birleştirme yapılabilmektedir.

Bu doktora tezi çalışmasında SKK yöntemi, 5083 alüminyum alaşımlarının birleştirilmesi için uygulanmıştır. 5083 alaşımlarının kullanılmasının nedeni, bu alaşımların endüstride yoğun biçimde kullanılması ve ayrıca alüminyum elementi ile birlikte içeriğinde bulunan magnezyum ve manganez elementlerinin farklı kaynak yöntemlerine elverişli olmasıdır.

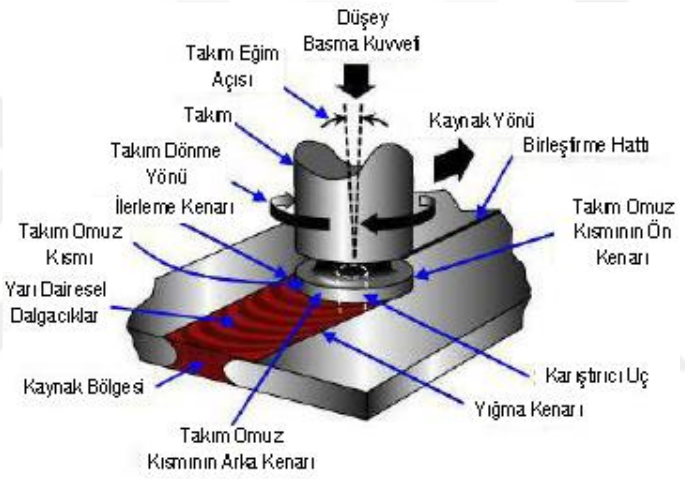
Alüminyum alaşımları ve magnezyum alaşımları demir dışı metaller arasında; düşük yoğunluklara sahip olması, kolay şekil verilebilme yetenekleri, yüksek ısıl iletkenlikleri, geri dönüşüm potansiyeli ve üstün mekanik özelliklere sahiptir.

Bu özellikler sebebiyle bu alaşımlar; uzay ve havacılık teknolojileri, askeri sanayi, makina teknolojileri ve otomotiv yedek parçaları ile elektrik ve elektronik sanayi gibi yüksek teknolojiler gerektiren sektörlerde kullanımları gün geçtikçe artmaktadır. Alüminyum ve Magnezyum alaşımlarının bir arada kullanılması ile oluşturulan yapıların önemi imalat alanında tercih edilip fark yaratmaktadır. İmalatta gün geçtikçe tercih edilen kavramlar; hafiflik, dayanım, performans, tasarım kolaylığı, kullanım kolaylığı, kolay birleştirilebilme ve şekillendirilebilme olarak bilinmektedir.

İçerdikleri alüminyum ve magnezyum sebebiyle özellikle hafiflik ve dayanım, 5XXX serisi alüminyum alaşımlarında mevcuttur ve endüstriyel uygulamalarda özellikle bundan dolayı tercih edilmektedir. Bununla birlikte kolay birleştirilebilme kabiliyeti, kolay kaynak edilebilme özelliğini de ön plana çıkarmaktadır. Dayanıklılık genel olarak istenilen bir özellik olmakla birlikte hafiflik, tasarım ve üretimde performans artışı ile emisyon azaltılması vasıtasıyla enerji tasarrufu sağlamaktadır.

SKK yönteminin prensibi incelendiğinde; yöntem alın alına bir araya getirilmiş iki ayrı malzemeye yüksek devirlerde dönmekte olan bir takım daldırılarak birleştirilmek istenen bölgede hareket ettirilmesinden ibarettir.

Şekil 1.1'de işlemin prensipleri verilmiştir;



Şekil 1.1. SKK ayrıntılı görünüm (Yılmaz, Ünlü, Uzkut & Ertürk, 2016)

Şekil 1.1'de şematik olarak gösterildiği gibi sap, omuz ve pim olmak üzere ayrı kısımlardan oluşan yekpare takım, sürtünme ve karıştırma işlemi neticesinde SKK işlemini gerçekleştirir. Birleştirilecek alaşımlara göre bu takımların kendine has özellikleri de çeşitlilik göstermektedir.

Birleştirilecek malzemelerin geometrik olan yapısına göre takım sabit bir hızla kaynak işlemi esnasında kendi ekseni etrafında döndürülür. Malzemelere ise kaynak ekseni boyunca bir ilerleme hareketi yaptırılır. Gelişmiş olan makinalarda ise takıma hem dönme hem de ilerleme hareketi yaptırılabilir.

Takımın birleştirilecek olan levhalara temasıyla birlikte, ısınma meydana gelmektedir. Daha sonra da mekanik sürtünmenin etkisiyle ısı artmakta ve malzemeler

plastik deformasyona uğramaktadır. Oluşan bu deformasyon malzemelerin bölgesel olarak akışını sağlamakta ve birleştirme gerçekleşmektedir.

SKK yöntemi sonucunda oluşan mikroyapıların şematik görünümü aşağıdaki şekilde verilmektedir. Genel olarak incelendiğinde; kaynak edilmiş bölgeden uzak olup deforme olmamış olan "Etkilenmemiş Bölge (Ana Malzeme) – A" bulunmaktadır. Hemen yanında, kaynak merkezine yakın olan plastik deformasyona uğramamış ancak ortaya çıkan ısı sebebiyle mekanik ve mikroyapısal değişimlerden etkilenen "Isıdan Etkilenmiş Bölge (IEB) – B" vardır. Kaynak eksenine doğru ilerlendiğinde, takım tarafından plastik deformasyona uğramış "Termo Mekanik Etkilenmiş Bölge (TMEB) – C" görülmektedir. Bu bölge hem ısıl olarak hem de mekanik olarak etkilenmektedir. Birleştirilen malzeme alüminyum alaşımı ise bu bölgede yeniden kristalleşme olmaksızın önemli miktarlarda plastik deformasyon gerçekleştirebilmek mümkündür. Şekilden de görülebileceği gibi TMEB içerisinde, alüminyum alaşımları için yeniden kristalleşmenin gerçekleşmiş olduğu "Dinamik Yeniden Kristalleşmiş Bölge (DYKB) – D" bulunmaktadır. Diğer alaşımlarda ise bu iki bölge (C + D) bir arada "Termo Mekanik Etkilenmiş Bölge (TMEB) – C + D" olarak değerlendirilmektedir (Binal, 2006).

Şekil 1.2. SKK Temel Kaynak Bölgeleri (Binal, 2006)

A – Etkilenmemiş Bölge (Ana Malzeme)

B – Isıdan Etkilenmiş Bölge (IEB)

C – Termo Mekanik Etkilenmiş Bölge (TMEB)

D – Dinamik Yeniden Kristalleşmiş Bölge (DYKB)

SKK'nın diğer kaynaklı birleştirme yöntemlerine göre bazı avantajları vardır;

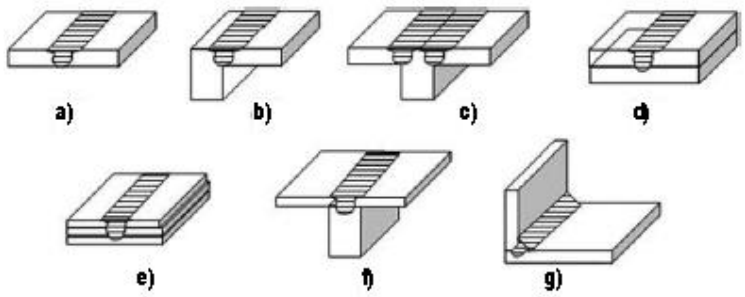
- Tüm birleştirme pozisyonlarına uygun olma
- Enerjiyi verimli biçimde kullanabilir, çevre dostudur

- İlave elektrod gerektirmez
- Koruyucu atmosfere ihtiyaç duymaz
- Sıvı hal kaynak yöntemleri ile birleştirilmesi zor olan farklı malzemeler dahi birleştirilebilir
- Birleştirme işlemi sonrası cüruf oluşmaz
- Çatlamalar ile çarpılmalar, diğer yöntemlerle karşılaştırıldığında daha az kalmaktadır
- Makinaların otomasyonu daha kolaydır
- Makinaların bakım onarım maliyetleri daha düşüktür

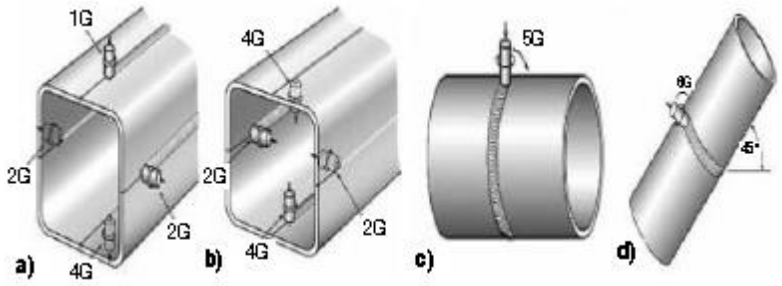
SKK az da olsa bazı dezavantajlara sahiptir;

- İşlem neticesinde, karıştırıcı takım sebebiyle kaynak işlemi başlangıç ve bitiş kısımlarında delikler kalmaktadır
- Geleneksel yöntemlere göre daha yavaş bir biçimde dikiş elde edilmektedir
- Birleştirme işleminden önce kaynak yüzeyleri düzgün bir biçimde hazırlanmalıdır
- Birleştirilecek parçalar, düzgün bir biçimde sabitlenmelidir.
- SKK işleminin gerçekleştirildiği tezgahlar maliyetlidir.

SKK yönteminde uygulanabilen birleştirmeler; alın, iç ve dış köşe, T-köşe, bindirme şeklindedir ve Şekil 1.3'te verilmiştir (Binal, 2006). SKK yöntemi ile çeşitli geometrilerdeki levhaların bindirme ve alın kaynakları yapılabilmektedir. Alüminyum alaşımları ve benzeri diğer alaşımlardan L ve T geometrisine sahip malzemelerin imalatında ve boru kaynağında bu yöntem uygulanabilmektedir. SKK ile boru ve profil birleştirme örnekleri aşağıda Şekil 1.4'te şematik olarak verilmiştir (Binal, 2006);



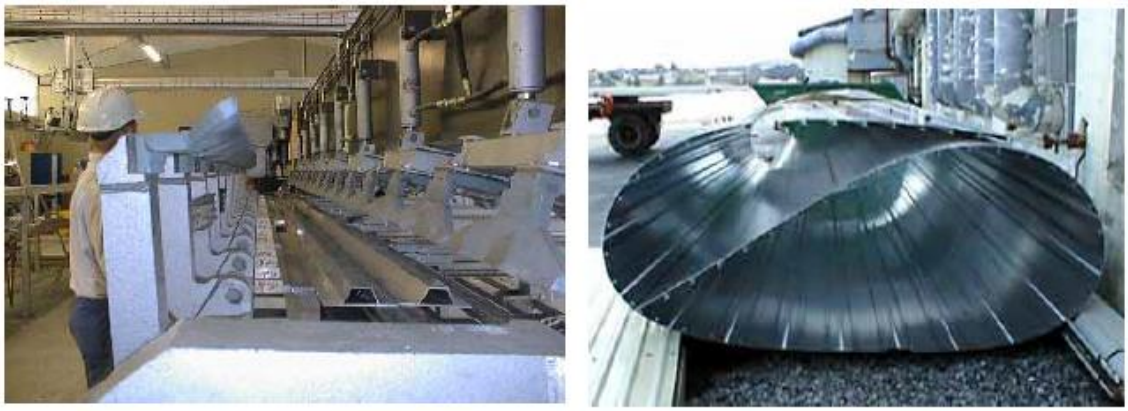
Şekil 1.3. SKK birleştirme örnekleri: a) alın, b) kenar, c) T alın, d) bindirme, e) çoklu bindirme, f) T bindirme, g) iç köşe (Binal, 2006)



Şekil 1.4. SKK boru ve profil birleştirme örnekleri (Binal, 2006)

SKK yönteminin kullanım alanları incelendiğinde; gemi endüstrisi, uçak, uzay ve havacılık endüstrisi, otomotiv parçaları üretimi ve hızlı tren üretimi göze çarpmaktadır.

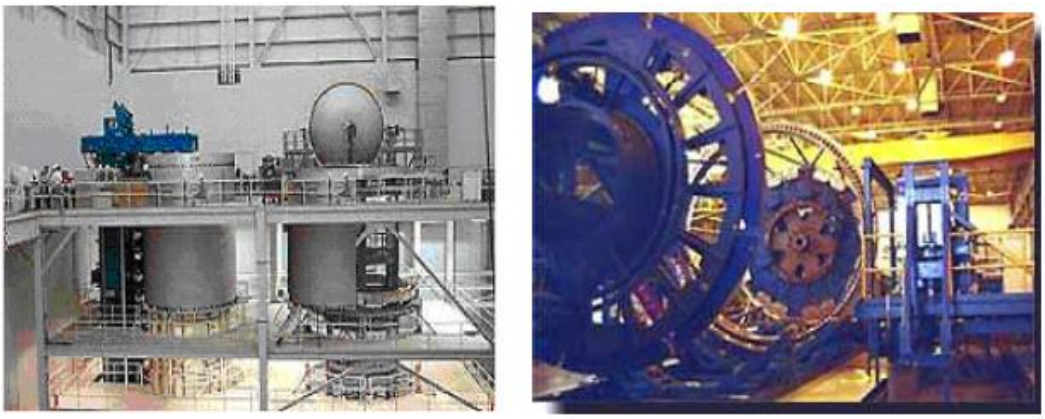
Gemi endüstrisinde ilk kullanım, balıkçı gemilerinde dondurucuların alüminyum panellerinin birleştirmesinde kullanılmıştır. Bu işlemi cazip kılan mümkün olan en düşük çarpılma ve diğer yöntemlere göre daha yüksek verimliliğe sahip olmasıdır. Bu yöntem ile Japonya'da deniz suyu korozyonuna dayanıklı panellerin üretimi gerçekleştirilmektedir. Yine yüksek hızlı feribotlardaki alüminyum paneller SKK ile kaynak edilmektedir. Bu yöntem ile çarpılma ve kalıntı gerilmelerin minimum seviyede tutulması sağlanmaktadır (Çam, 2003).



Şekil 1.5. Alüminyum Panellerinin SKK ile birleştirilmesi (Çam, 2003)

Uçak, uzay ve havacılık endüstrisinde ilk kullanım 1993'de National Aeronautics and Space Administration (NASA) ile başlamıştır. Uzay Mekiği Yakıt Tankı (Space Shuttle External Tank) projesi için hali hazırda kullanılmakta olan 2219 Al alaşımı yerine yüksek dayanımlı düşük yoğunluklu hafif Al-Li 295 alüminyum alaşımı tercih edilmiştir.

Bu alaşım ile hem ağırlık 3.500 kg azaltılmış hem de bu yeni tercih edilen Al-Li 295 alaşımının sıvı hal kaynak yöntemi ile birleştirilmesinin çok zor olması nedeniyle katı hal kaynak yöntemlerinden olan SKK kaynak yöntemi, mukavemet azalmasının daha az da olması sebebiyle tercih edilmiştir. Uzay mekiklerinin yakıt tanklarında başarılı bir şekilde uygulanmaktadır (Çam, 2003).



Şekil 1.6. Space Shuttle External Tank projesi SKK çalışmalarından görüntüler (Çam, 2003)

SKK, yolcu uçaklarında tercih edilen hafif alüminyum alaşımlı yapılarda büyük önem arz eder. T birleştirmeler, bindirme birleştirmeler, alın birleştirmeler gibi çeşitli uzay ve havacılık uygulamalarında kullanılan kaynaklı yapılarda, bu yöntem kullanılmaya devam edilmektedir. Şimdiye kadar, uçakların çeşitli yerlerinde SKK uygulanmış ve başarı ile sonuçlanmıştır.

Otomotiv ve ulaşım sektöründe çeşitli alüminyum alaşımların birleştirilmesinde çözülebilir ve çözülemeyen olmak üzere birçok birleştirme metodu kullanılır. Bu birleştirmelerden olan kaynak yöntemleri ilgili ürünün yüksek bir dayanıma sahip olması gerektiği durumlarda tercih edilir. Şekil 1.7'de SKK ile birleştirilen bir otomobil jantı örneği verilmiştir (Çam, 2003).

Şekil 1.7. SKK ile birleştirilen bir otomobil jantı (Çam, 2003)

Otomotiv sektöründe yüksek üretim miktarları ve düşük maliyetler dolayısıyla yoğun olarak alüminyum alaşımları için geleneksel kaynak yöntemlerinin tercih edilmesine rağmen SKK yönteminin kullanımı sınırlıdır ve tercih edilmesi de bir miktar zaman alacaktır. İlerleyen zaman içerisinde iyi kalite ve yüksek kaynak dayanımı için özellikle otomotiv sektöründe Mg alaşımlarının kullanımı yaygınlaşabilir.

SKK yöntemi, düşük miktarlarda dayanım kaybına sebep olduğundan iyi bir alternatif olarak Japonya ve Avrupa'da hızlı trenlerin vagon imalatında SKK ile üretilen paneller kullanılmıştır (Şekil 1.8).

Şekil 1.8. SKK ile birleştirilen hızlı tren alüminyum panelleri - Japonya (Çam, 2003)

BÖLÜM 2

GENEL BİLGİLER

2.1. Literatür Çalışması

SKK ile ilgili çeşitli araştırmaların başlangıcı, TWI'da Aralık 1991'de Thomas, W.M. ve arkadaşları tarafından SKK yönteminin patentinin alınmasına dayanmaktadır. Sürtünme Karıştırma Alın Kaynağı üzerine alınmış olan ve deneysel olarak kanıtlanmış olan bu ilk patent (Thomas, Nicholas, Needham, Murch, Temple-Smith & Dawes, 1991) ile başlayan araştırma ve uygulama çalışmaları yine TWI'da, Nicholas, E.D. tarafından konunun temel prensipleri hakkında bilgi verilmesi ile devam etmiştir (Nicholas, 1991).

Mishra ve Ma tarafından SKK ve işlemleri hakkında yapılmış olan detaylı genel gözden geçirme çalışmasında, çeşitli alaşımlar ele alınmış ve yöntem hakkında detaylı bilgiler verilmiştir. İşlem parametreleri, işlem modellemeleri, mikroyapısal değişimler, dayanım açısından değişimler ve benzeri değerlendirmeler gerçekleştirilmiştir (Mishra ve Ma, 2005).

Çam tarafından alüminyum ve alüminyum alaşımları için SKK ve SKK'daki gelişmeler hakkında detaylı çalışmalar yapılmıştır. Alüminyum alaşımları için geliştirilmiş yeni bir kaynak teknolojisi olarak SKK yönteminin ele alındığı bu çalışmalarda, SKK prensibi hakkında genel bilgiler verilerek çeşitli alüminyum alaşımlarının kaynak performansları, yöntemin genel olarak uygulama alanları ile avantaj ve dezavantajları hakkında güncel bilgiler verilmiştir (Çam, 2001), (Çam, 2003) ve (Çam, 2005).

Zhou ve arkadaşları tarafından 5083 Al alaşımlarında SKK'nın yorulma özellikleri üzerinde yapılan çalışmada, alaşımlar SKK ve Metal Inert Gas (MIG) kaynak

yöntemleriyle kaynatılmıştır. SKK yöntemi ile MIG yöntemine göre daha yüksek yorulma dayanımı değerleri elde edilmiştir (Zhou, Yang & Luan, 2005).

Mert ve Kaluç tarafından yapılan araştırmada SKK takımlarındaki gelişmeler hakkında araştırma yapılmıştır. Çeşitli takımlar hakkında detaylı bilgiler verilmiştir (Mert ve Kaluç, 2003).

Colligan tarafından gerçekleştirilen çalışmada, alüminyumun SKK hakkında kısa bilgiler verilerek geliştirilen tasarım imkanlarına göre kaynak özelliklerini detaylandırmak üzere, güvenilir kaynak dikişleri için malzeme çeşitliliği de göz önünde bulundurularak takımların tasarımı ve az bilinen malzeme akış davranışını incelenmiştir. Deformasyon işleminin kavramsal bir modelinin geliştirilmesi amacıyla SKK esnasında malzemenin hareketi araştırılmıştır. Kaynak takım performansını tahmin etmek için işlemi modellemek üzere çalışmalar gerçekleştirilmiştir (Colligan, 1999).

Kallee ve arkadaşları hafif malzemelerin SKK hakkında araştırmalar yapmıştır (Kallee, Thomas & Nicholas, 2006).

Lomolino ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen araştırmada SKK ile birleştirilen alüminyum alaşımlarının yorulma dayanımı ve tasarım eğrileri olarak bir takım sonuçlar elde edilmiştir. Yapılan araştırmada elde edilen sonuçlar ile SKK yönteminin yapısal boyutlandırılması ve tasarımı için öneriler verilmektedir (Lomolino, Tovo & Santos, 2005).

Şık ve Kayabaş 1050 alüminyum alaşımlarını SKK yöntemi ile alın pozisyonunda birleştirdikten sonra mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Farklı parametreler seçilerek yapılan çalışmada, yüksek devir sayılarında ilerleme hızı sabit tutulduğu durumda çekme dayanımı ve sertlik değerlerinin düştüğü, ayrıca yüksek devir sayıları ile ilerleme hızları da arttırıldıkça giren ısı miktarının azaldığı ve mekanik özelliklerde artış olduğu tespit edilmiştir (Şık ve Kayabaş, 2003).

Özarpa tarafından 2024 ve 5754 alüminyum alaşımlarının birleştirilmesi üzerine yapılan SKK çalışmasında, 2024 alaşımının hem temin edildiği halde hem de yapay yaşlandırma sonrası SKK yapılarak kaynak performansları incelenerek mekanik ve metalurjik deneyleri gerçekleştirilmiştir (Özarpa, 2005).

Eren tarafından yine alüminyum alaşımlarından biri olan AA 6063-T6 alaşımından üretilmiş olan boruların SKK, değişik devir sayıları ve ilerleme hızlarında

gerçekleştirilmiştir. Mikro sertlik ve yüzey pürüzlülüğü değerleri ölçülmüştür. Kaynak işlemi sonucu elde edilen mikroyapılar detaylı biçimde incelenmiştir (Eren, 2005).

Dilek tarafından gerçekleştirilen çalışmada, 5186 ve 5083 alüminyum levhaların SKK yöntemi ile birleştirilmesi sonrası mekanik ve metalurjik deneyler gerçekleştirilmiştir. Çekme ve sertlik değerleri incelemesi sonrası optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile detaylı metalurjik inceleme yapılmıştır (Dilek, 2006).

Doğan'ın 5754 alüminyum alaşımlarının SKK için gerçekleştirmiş olduğu çalışmada değişken parametrelerde metalurijk yapı ve mekanik özellikler incelenmiştir. Kaynak işlemlerinin başarılı bir biçimde gerçekleştirildiği ve beklenen sonuçların elde edildiği irdelenmiştir (Doğan, 2006).

Malta, 5754 alüminyum alaşımı ile pirinç (70 Cu – 30 Zn) malzemeyi SKK ile bindirme kaynağı şeklinde birleştirmiş ve daha önceki çalışmalara benzer şekilde mekanik özelliklerini incelemiştir. Ortaya çıkan sonuçlar alüminyum alaşımları ile pirinç malzemelerin birleştirilebildiğini göstermiştir (Malta, 2006).

Binal, 2024-T3 alüminyum levhalar için SKK sonrası mikroyapı ve mekanik özellikleri incelemiştir. İlgili çalışmada karıştırıcı uç geometrisi sabit tutularak farklı devir sayıları ve farklı ilerleme hızları için SKK deneyleri gerçekleştirilerek işlem parametrelerinin mekanik ve metalurjik testlere etkileri araştırılmıştır (Binal, 2006).

Güçlüer tarafından 5086 H32 alüminyum levhaların SKK yöntemi ile alın kaynağı için yapılan çalışmada mekanik özellikler incelenmiştir. Sabit devir sayısı ve farklı ilerleme hızlarında gerçekleştirilmiş olan deneylerde kaynak ilerleme hızlarına göre kaynak kalitesi ve performansına etkisi araştırılmıştır (Güçlüer, 2007).

Sayer, 6063 alüminyum alaşımlarının SKK ile farklı parametrelerin dayanım ve mikroyapı üzerine etkilerini incelemiştir. Mikroyapı için yapılan incelemelerde yeniden kristalleşme sebebiyle küçük taneli ve homojen yapıların meydana geldiği tespit edilmiştir. Çekme deneyleri sonucunda numunelerin çoğunda kopma ITAB bölgesinden kopmuştur. Yorulma deneyleri sonucunda düşük devir sayısı ile birleştirilen numuneler yüksek devir sayısı ile birleştirilenlere göre daha erken deforme olmuştur (Sayer, 2007).

Bozu tarafından 7075-T6 alüminyum alaşımlarının SKK ile birleştirilmesi üzerine gerçekleştirilen çalışmada, karıştırıcı uçlar, kalıp şekli, ilerleme hızı ve devir sayısı değiştirilmiştir. İlerleme hızlarının artmasıyla çekme dayanımının arttığı, artan devir

sayısı ile çekme dayanımının azaldığı tespit edilmiştir. İlerleme hızı arttığında kaynak işleminde meydana gelen ısının azaldığı, devir sayısı arttığında ısının arttığı tespit edilmiştir (Bozu, 2007).

Hirata ve arkadaşları, 5083 Al alaşımının SKK ile birleştirilmesi esnasındaki parametrelerin, tane boyutu ve tane oluşumu üzerine etkilerini araştırmışlardır. SKK ile birleştirilmiş 5083 Al alaşımının karıştırma bölgesinin mikroyapısı ile mekanik özellikleri arasındaki ilişki incelenmiştir. Çeşitli SKK şartlarında birleştirilmiş 5083 Al alaşımlarının karıştırma bölgelerinin mikroyapılarının ince eş eksenli tanelerden oluştuğu ve bununla birlikte karıştırma bölgesinin tane boyutunun SKK esnasındaki sürtünme ısı akışının azalmasıyla birlikte azaldığı tespit edilmiştir. Sünekliğin azalan sürtünme ısı akışı ile arttığı gözlemlenmiştir. Karıştırma bölgesinin tane boyutunun iyileştirilmesi ile birlikte SKK oluşumunun iyileştiği belirtilmiştir (Hirata, Oguri, Hagino, Tanaka, Chung, Takigawa & Higashi, 2007).

Kaptan, SKK birleştirmelerinde farklı geometride uçların, birleştirme kalitesine olan etkilerini incelemiştir. Farklı uçlara göre numunelerde çekme, mikroyapı ve mikro sertlik deneyleri gerçekleştirilerek en iyi verimi sağlayan uçlar tespit edilmiştir (Kaptan, 2008).

Kim ve arkadaşları, SKK ile birleştirilmiş olan 5083-H32 ve 6061-T651 Al alaşımlarının yorulma çatlağı yayılımı davranışını, değişken çatlak ucu itici kuvveti değerlerinde dinamik olarak yeniden kristalleşmiş bölgeye paralel büyüyen yorulma çatlağı şeklinde sırasıyla değişken oranlarda incelemişlerdir. Çeşitli özellikler ve davranışlar, artık gerilme ölçümüne ve fraktografik gözleme dayalı olarak tartışılmıştır (Kim, Lee & Kim, 2008).

Aydın, yaşlandırılabilir 2024 ve yaşlandırılamayan 1050 alüminyumların SKK ile çeşitli parametreler kullanılarak birleştirmiştir. SKK öncesi ve sonrası yaşlandırma işleminin etkileri incelenmiş olan çalışmada, mikroyapı, sertlik, korozyon öncesi ve sonrasında çekme dayanımı üzerine araştırmalar yapılmıştır. 2024 ve 1050 alaşımlarının kaynak sonrası özellikleri de kendi arasında karşılaştırılmıştır (Aydın, 2008).

Lombard ve arkadaşları, 5083-H321 alüminyum alaşımlarının yorulma ömrünün arttırılması ve hasarların en aza indirilmesi için SKK işlem parametrelerini optimize etme üzerine sistematik bir yaklaşımla çalışmalar gerçekleştirmiştir. Çekme dayanımı ve yorulma performansı arasında bir ilişki olduğunu, SKK ile birleştirilmiş zorlanma

sertleşmeli Al alaşımlarını görünüşte hasar tiplerinin varlığının etkilediğini ve birleşmelere bağlı olduğunu, bu hasarların plastik şekil değişimine bağlı olup kırılma izleri üzerinde kuvvetli bir etkisinin olduğunu tespit etmişlerdir (Lombard, Hattingh, Steuwer & James, 2008).

Tanrıöver tarafından gerçekleştirilen farklı özelliklerdeki 2024 ve 5052 alüminyumların SKK ile birleştirilmesi çalışmasında, devir sayısı ve ilerleme hızı değiştirilerek mekanik ve mikroyapısal özelliklerin değişimi incelenmiştir. Tek çeşit karıştırıcı ucu kullanılmıştır. Çekme ve yorulma deneyleri uygulanmış, taramalı elektron mikroskobunda metalurjik özelliklerin değişimi incelenmiştir (Tanrıöver, 2008).

Chen ve arkadaşları, 5083-O Al alaşımının SKK esnasında kaynak dikişinin oluşumunu incelemiştir. Çalışmada, SKK süresince sertleştirilmiş Al alaşımının iş parçası içerisinde kırılan ve gömülü kalan takımlar üzerinde metalografik analizler yapılmıştır. Takım ile kayma bölgesi arasındaki ilişkiler detaylandırılmıştır. (Chen, Pasang & Qi, 2008)

Kafalı, AA 2024 alaşımlarının SKK ile birleştirilmesinde, çeşitli kaynak parametrelerinin kaynaklı birleştirmeye etkilerini incelemiştir. Karıştırıcı uca ait devir sayısını sabit tutarken kaynak ilerleme hızı farklı değerlerde seçilmiştir. Kaynak ilerleme hızı sabit tutulurken de karıştırıcı uca ait devir sayısı farklı değerlerde seçilmiştir. Tüm bu işlemler de üç farklı omuz genişliğinde tekrarlanarak deneyler gerçekleştirilmiş olup mekanik ve metalurjik özelliklerdeki değişimler incelenmiştir (Kafalı, 2009).

Han ve arkadaşları, 5083-O alaşımı için SKK'nda mekanik özelliklerin değerlendirilmesi üzerine yapılan araştırmada, 800 dev / dak sabit devir sayısı ve 3 farklı ilerleme hızı kullanılmıştır. Kusurlar, kaynak hataları ve süneklik durumlarına göre ilgili birleştirmeler için optimum değerler belirlenmeye çalışılmıştır (Han, Lee, Park, Ko, Woo & Kim, 2009).

Öcalır, SKK ile birleştirilen AA 1050 alaşımlarının optimum kaynak parametrelerini saptamaya çalışmıştır. Çekme, mikrosertlik ve mikroyapı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Takımın ilerleme hızı ve devir sayısının çekme dayanımları ve mikrosertlik değerlerini etkilediği gözlemlenmiştir. En uygun kaynak performansının büyük pim çapı, yüksek ilerleme hızı ve düşük devir sayısı ile elde edildiği tespit edilmiştir (Öcalır, 2009).

Cebeci tarafından 1050 ve 5754-H111 Al alaşımların SKK ile birleştirilmesi üzerine gerçekleştirilen çalışmada, mekanik özelliklerine etkisi incelenmiştir. SKK ile uyumlu parametrelerde tek taraflı ve çift taraflı birleştirmeler gerçekleştirilmiştir. Birleştirilen parçalarda kaynak sonrası distorsiyon görülmemiştir (Cebeci, 2010).

Malyer, 5000 serisi alüminyum alaşımlarının SKK ile birleştirilmesinde kaynak parametrelerini incelemiştir. 5083-H113 alüminyum alaşımı kullanılan birleştirmelerde, SKK deneyleri 5 farklı devir sayısı ve 3 farklı ilerleme hızında gerçekleştirilmiştir. Kaynak işleminin kalitesi, çekme deneyleri ve mikro sertlik deneyleri ile belirlenmiştir. Sonrasında kaynak bölgesi iç yapıları değerlendirilmiştir (Malyer, 2010).

Ağca, SKK birleştirme yöntemiyle doğrusal olmayan takım yolu kullanarak farklı alüminyum alaşımlı sacları farklı işlem parametreleri kullanarak birleştirmiş ve ilgili kaynak bölgesinin mekanik özelliklerini incelemiştir. Kaynak dikiş uzunluklarını arttırarak kaynak bölgesinin dayanımını arttırmak için doğrusal olmayan takım yolları seçilmiştir. Takım yollarına, ilerleme hızlarına, devir sayılarına bağlı olacak şekilde değişimler araştırılmış ve kaynak kalitesine etkisi değerlendirilmiştir. Doğrusal olmayan takım yolu vasıtasıyla dayanım değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir (Ağca, 2010).

Demirkesen tarafından SKK yönteminin endüstriye dayalı uygulamalarına örnek olması açısından raylı sistemlerin gövdelerinde kullanılan saclarda uygulanabilirliği araştırılmıştır. Alüminyum malzemelerin çelik malzemelere göre hafif olması sebebiyle demiryolu endüstrisinde her geçen gün kullanımı artmaktadır. 6005 alüminyum numuneleri SKK yöntemi ile çeşitli geometrilerde birleştirilmiştir. Mekanik ve metalurjik deneyler gerçekleştirilmiştir (Demirkesen, 2010).

Yıldırım, 3000 serisi alüminyum alaşımlarının SKK ile birleştirilmesi sonrası yorulma davranışlarını araştırmıştır. Tek eksenli yorulma cihazı ile gerçekleştirilen yorulma deneyleri sonucunda ilgili alaşımların başarılı bir şekilde kullanılabileceği tespit edilmiştir (Yıldırım, 2010).

Tunç Önol tarafından 1050 alüminyum alaşımı ile saf bakırın bindirme SKK yöntemiyle birleştirilmesi sonrası metalurjik ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi için gerçekleştirilen çalışmada, değişik ilerleme hızları kullanılmış ve diğer parametreler sabit kalırken en uygun ilerleme hızı araştırılmıştır. En uygun mekanik özelliklere sahip birleştirmeler, yüksek ilerleme hızlarında elde edilmiştir. (Tunç Önol, 2010).

Vijavan ve arkadaşları tarafından 5083 Al alaşımında Taguchi tabanlı gri ilişki analizi kullanılarak SKK işlem parametrelerinin çok amaçlı optimizasyonu üzerine gerçekleştirilmiş olan çalışmada amaç, maksimum gerilmenin sağlandığı ve minimum enerjinin tüketildiği işlem parametrelerinin optimum seviyelerini bulmaktır. Gri ilişkisel dereceye göre, optimum parametre seviyeleri tanımlanmış ve parametrelerin önemli katkısı ANOVA ile belirlenmiştir (Vijayan, Raju & Rao, 2010).

Sayaca, 2014 alüminyum alaşımının SKK ile birleştirilmesi sonrası yorulma davranışlarını araştırmıştır. 3 devir sayısı ve 3 ilerleme hızı kullanılarak birleştirilen numuneler, eğilmeli yorulma deneylerine tabi tutulmuştur (Sayaca, 2010).

Kafalı, uzay ve havacılık endüstrisinde önemli bir yere sahip olan 6013-T6 alaşımının SKK ile birleştirme sonrası mikroyapı ve mekanik özelliklerini incelemiştir. Esas numune, kaynaklı numune ve yeniden ısıl işlem görmüş numunelere, çekme, yorulma ve sertlik deneyleri uygulanmıştır. Metalurjik yapılar da optik ve taramalı elektron mikroskopları ile incelenmiştir (Kafalı, 2011).

Huang ve arkadaşları, sürtünme karıştırma işlemi uygulanmış 5083 Al alaşımının mikroyapısal özelliğinin çekme özellikleri ve titreşim kırılma direncine etkisi isimli çalışmasında, optimum devir sayıları belirlenmiş ve birleştirmeler gerçekleştirilmiştir. Karıştırma bölgesinde tane incelmesi ve ince partiküller oluştuğu tespit edilmiştir. Çatlak yayılma direncinin sadece tane boyutuna değil, aynı zamanda ince taneciklere de bağlı olduğu gözlenmiştir (Huang, Lui & Chen, 2011).

Kumar ve arkadaşları, 5083 Al alaşımlarının SKK'nda, işlem parametrelerinin fonksiyonu olarak işlem kuvvetleri ve ısı girdisini değerlendirmiştir. Sonuçlar, takım devir sayısı, ilerleme hızı ve takım omuz çapının eksenel kuvveti ve ısı girdisini etkileyen en önemli parametreler olduğunu, düzlemsel kuvvetin ise ilerleme hızı ve takım uç çapından önemli ölçüde etkilendiğini göstermiştir (Kumar, Singh & Pandey, 2012).

Akkaş tarafından 6013-T651 alüminyum alaşımlarının SKK ile birleştirilebilirliği ve mikroyapı ile mekanik özelliklere etkisi araştırılmıştır. 2 farklı devir sayısı ve 3 farklı ilerleme hızı ile birleştirmeler gerçekleştirilmiş ve devir sayıları arttırıldığında dayanımda artış tespit edilmiştir. Çekme deneyi sonuçları incelendiğinde, kopmaların düşük devir sayıları için DYKB'de, yüksek devir sayıları için IEB'de meydana geldiği tespit edilmiştir (Akkaş, 2012).

Hassan ve arkadaşları tarafından Al matrisli kompozitlerin SKK birleştirmelerinde takım ucu geometrisinin etkisinin araştırıldığı çalışmada, kare, altıgen ve sekizgen geometrili takım uçları üretilmiştir. Bu farklı geometrilerdeki takım uçları ile yapılan birleştirmelerin mikroyapıya etkileri ve birleştirmelerin bazı mekanik özellikleri incelenmiştir. Kare geometrili takım ucu ile kaynak yapılan birleştirmelerin diğer geometrili takım uçlarına göre yapılan birleştirmelere göre daha iyi özelliklere sahip oldukları tespit edilmiştir (Hassan, Qasim & Ghaithan, 2012).

Campanelli ve arkadaşları, Al alaşımının SKK ve Lazer destekli SKK'nın analizi ve karşılaştırılması üzerine çalışma gerçekleştirmişlerdir. 6 mm kalınlığındaki 5754-H111 Al alaşımlara SKK ve Lazer destekli SKK deneyleri uygulanmıştır. Lazer destekli birleştirmelerin gerçekleştirilebilir olup olmadığı öncelikle araştırılmış ve sonrasında mikroyapı, mikro sertlik, kalıntı gerilme ve gerilme özelliklerindeki değişiklikleri değerlendirmek için lazer gücü ve sıcaklık gradyanı gibi işlem parametreleri incelenmiştir (Campanelli, Casalino, Casavola & Moramarco, 2013).

Rao ve arkadaşları tarafından 5083 Al alaşımının SKK bağlantılarının mekanik özellikleri ve çekme davranışı tahminleri üzerine yapılan çalışmada, SKK esnasında asıl malzemeye uygulanan asimetrik malzeme akışı, aşırı plastik deformasyon ve termal döngünün kaynak bölgesinde yerel mekanik özelliklerde bir değişime neden olan benzersiz bir mikroyapısal gelişim ile sonuçlandığı açıklanmıştır. SKK ile birleştirilen bağlantılarda yerel mekanik özellikleri belirlemek için mikro çekme ve girinti deneyleri uygulanmıştır. Lokal gerilme – zorlanma eğrileri, mekanik özelliklerin dik bir değişimi nedeniyle ilerleyen yönde büyük bir değişim sergilemiştir. Sonlu Eleman Modeli (FEM) mikro çekme deneyi ile ölçülen yerel mekanik özelliklere dayanan kaynaklı bağlantıların gerilme performansının FEM tahminlerinin, makro çekme deneyi verileri ile uyum içinde oldukları tespit edilmiştir (Rao, Huber, Heerens, dos Santos & Huber, 2013).

Choi ve arkadaşları tarafından 700, 1050 ve 1060 dev/dak takım devir sayılarında ve 100 mm/dak sabit ilerleme hızı ile 5083 alüminyum alaşımlarının SKK işlemleri gerçekleştirilmiştir. SKK işlemi uygulanmış yapılar ve satın alındığı haliyle alaşım, ciddi duyarlılık elde etmek için 175 ^{o}C sıcaklıkta 240 saat süreyle ısıl işleme tabi tutulmuştur. SKK işleminin, nitrik asit kütle kaybı testi ile ölçülen duyarlılık tepkisini önemli ölçüde azalttığı gösterilmiş ve duyarlılık hasarını azaltmak için kullanılabileceği öne sürülmüştür. SKK işleminden elde edilen mikroyapılar, bu sonuçtan sorumlu olduğu

düşünülen beta fazı çökeltilerinin dağılımındaki varyasyonları belgelemek için Optik Mikroskop, SEM ve Elektron Prob Mikro-Analizörü ile değerlendirilmiştir (Choi, Ahn, Quesnel & Jung, 2013).

Küçükömeroğlu ve arkadaşlarının 5754 ve 6061 Al alaşımlarının SKK yöntemi ile kaynak edilebilirliği için takım baskı kuvvetinin etkisi üzerine yaptıkları çalışmada, sabit takım geometrisi ve sabit takım açıları ile değişken ilerleme hızı, değişken devir sayısı ve özellikle değişken takım baskı kuvveti ile birleştirmeler ve sonrasında kaynaklı numuneler için çekme, eğme ve mikro sertlik testleri ile mikroyapı ve sertlik deneyleri gerçekleştirilmiştir. 5754 ve 6061 Al alaşımlarının başarılı bir şekilde birleştirilebilmesi için en az 6 kN takım baskı kuvvetine ihtiyaç olduğu tespit edilmiştir (Küçükömeroğlu, Yılmaz & Aktarer, 2013).

Nourani ve arkadaşları, 6061 Al alaşımının SKK için birleştirilmiş bütünleşmiş bir multifizik modeli geliştirmişlerdir. Newtonian olmayan sıkıştırılamaz akışkan dinamiklerinden, iletim ve taşınım yoluyla ısı transferinden ve bir dizi denklemin birleştirildiği yeni entegre bir multifizik modeli SKK için önermişler ve 6061 Al alaşımına uygulamışlardır. (Nourani, Milani, Yannacopoulos & Yan, 2014).

Fraser ve arkadaşları SKK işlem parametrelerinin Monte-Carlo benzeşimi yoluyla SKK takım ilerleme hızının optimizasyonu isimli çalışma yapmışlardır. Çalışma sonucunda; SKK işlemi sırasında sıcaklık dağılımının, doğrusal olmayan sonlu fark formülasyonu ile belirlenebileceğini, Monte-Carlo benzeşim yönteminin SKK optimizasyonu için kullanılabilecek güçlü bir araç olduğunu, fazla sayıda parametreye genişletme imkanı bulunduğunu, önerilen optimizasyon yaklaşımının deneysel optimizasyon çalışmasıyla yakından uyum içerisinde olduğunu, bu tekniği kullanarak optimum işlem parametrelerini hesaplama süresinin 30 dakikadan daha kısa bir sürede bulunabileceğini önermişlerdir. (Fraser, St-Georges & Kiss, 2014).

Serindağ, SKK modellemesini sonlu elemanlar yöntemiyle araştırmıştır. Gerçekleştirilen araştırmada ergitme esaslı kaynak yöntemleriyle birleştirilmesi zor olan magnezyum ve alüminyum alaşımları SKK yöntemiyle birleştirilmiş, deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Kaynak bölgesindeki sıcaklık dağılımları ölçülmüş ve sonlu elemanlar yöntemleri için katı modelleme yapılmıştır. ANSYS programından faydalanılmış ve termal analiz ile yapısal analiz gerçekleştirilmiştir (Serindağ, 2014).

He ve arkadaşları, SKK yönteminin sayısal analizini gözden geçirmişlerdir. SKK işlemlerinin sayısal analizindeki son gelişmeler ve SKK ile birleşmelerin mikroyapılarının incelendiği çalışmada, malzeme akış modellemesi, çözüm ağı prosedürü ve hasar kriteri tartışılmıştır. (He, Gu & Ball, 2014).

Casalino ve arkadaşlarının Al alaşımlarının SKK'nda omuz geometrisinin ve takım kaplamasının etkisinin incelendiği çalışmasında, 3 mm kalınlığında 5754 Al alaşımı birleştirilmiş ve mikroyapı ile mikro sertlik üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Deneyler esnasında çeşitli geometriler ve kaplamalar uygulanmıştır (Casalino, Campanelli & Mortello, 2014).

Başar tarafından farklı kimyasal ve fiziksel özelliklere sahip bakır ve alüminyum alaşımların SKK ile birleştirilmesinde optimum kaynak parametrelerinin belirlenmesi üzerinde araştırma yapılmıştır. 3 farklı devir sayısı ve 3 farklı ilerleme hızında SKK ile birleştirilen numuneler, mekanik ve metalurjik deneylerle incelenmiştir (Başar, 2016).

Jesus ve arkadaşlarının 5083-H111 alüminyum alaşımlarının T-bağlantıları için SKK ile bileştirilmelerinde geometrik parametrelerin etkisi üzerine çalışmasında, 3 farklı takım geometrisi ve 2 farklı geometrik birleştirme için incelemeler yapılmıştır (Jesus, Gruppelaar, Costa, Loureiro & Ferreira, 2016).

Emiralioğlu, farklı alüminyum alaşımlarının SKK ile birleştirilmesinde kaynak parametrelerinin etkisini incelemiştir. 3 farklı takım geometrisi, devir sayısının ve ilerleme hızının 6082-T6 ve 7075-T651 alüminyum alaşımlarının SKK ile kaynak edilebilirliğe etkisi araştırılmıştır. Helisel geometriye sahip takımın kaynaklı bağlantılar için daha uygun değerler verdiği belirlenmiştir (Emiralioğlu, 2017).

Öcalır, alüminyum alaşımlarının SKK ile birleştirilmesinde optimum kaynak parametrelerinin belirlenmesini amaçlamıştır. 5083-H111 ve 6082-T651 alaşımlarının birleştirildiği çalışmada çeşitli devir sayıları ve ilerleme hızları için deneyler uygulanmış ve kaynaklı bağlantılar üretilmiştir. Mekanik ve metalurjik özellikler incelenmiştir. Her iki alaşım için de farklı sonuçlar ortaya çıkmıştır (Öcalır, 2019).

Şanseven tarafından SKK ile birleştirmelerde parametrelerin dikiş kalitesine etkileri araştırılmıştır. 5754-H11 alüminyum alaşımının kullanıldığı çalışmada, 3 farklı devir sayısı ve 3 farklı ilerleme hızı kullanılmıştır. Birleştirilmiş numunelerde mekanik özellikler incelenmiştir (Şanseven, 2019).

2.2. Problem ve Önemi

Geleneksel olan diğer kaynak yöntemleri ile birleştirilmesi daha zor olan alüminyum alaşımlarının SKK'nın üstünlükleriyle daha yaygın bir biçimde kullanılması ve ayrıca demir dışı metallerden olan bakır, titanyum, magnezyum alaşımları ile kompozitlerde bu yöntemin uygulanması, SKK'na olan ilgiyi gün geçtikçe arttırmakta ve araştırmacıları bu yönteme yönlendirmektedir.

Bu çalışmada, SKK yöntemi ile birleştirilen 5XXX alüminyum alaşımlarından endüstriyel uygulamalarda tercih edilen 5083 alüminyum alaşımı seçilmiştir. Tercih edilmesinde en önemli nedeni içeriğinde bulunan magnezyum ve manganez elementlerinin farklı kaynak yöntemlerine elverişli olmasıdır. Ayrıca 5083 alüminyum alaşımı, kaynaklı imalata uygun olması sebebiyle depolama tankları, basınçlı kaplar, katlanabilir köprüler, kaynaklı tank treylerler, kaynaklı kamyon gövdeleri ve platformlarda tercih edilmektedir.

Büyük öneme sahip bu alaşımın tercih edilmesiyle gerçekleştirilen bu çalışma sayesinde;

- 5083 alaşımlarının sahip oldukları düşük yoğunluk sayesinde daha hafif yapılarının kaynak edilebilirliği,
- Alüminyum ve magnezyum içeren bu alaşımlarının SKK ile kaynaklı birleştirme sonrası tek parça olarak mühendislik yapılarında uygulanmasının, tasarım esnekliği sağlayarak dayanım ve üretim için uygunluğu,
- 5083 alaşımının başarılı bir şekilde SKK ile kaynak edilebilmesi ile dayanım ve benzeri mekanik özelliklerinin değişimi incelenmiştir.

2.3. Bu Çalışmada Amaçlananlar

Öncelikli olarak ilgili alaşımın diğer alüminyum alaşımlarına göre sahip olduğu kaynak kabiliyeti dahilinde, çeşitli parametreler kullanılarak kaynak edilebilirliğinin ve kaynağa uygunluğunun önceki çalışmalar kapsamında incelenmesi, geliştirilmesi ve uygulanması amaçlanmıştır.

Bu çalışmada, önceki araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalar göz önünde bulundurularak ve malzeme özelliklerine de uygun olarak makina ve kalıp tasarımı

gerçekleştirilmiştir. Makina Mühendisliği Bölümü İmalat Laboratuvarı'nda bulunan freze tezgahı SKK makinasına dönüştürülmüş ve deneyler için özel bir kalıp üretilmiştir. Daha önce yapılan çalışmalarda kullanılan SKK kaynak parametreleri detaylı biçimde incelenmiş ve makina kapasitesi dahilinde daha farklı parametreler için deneyler yapılması ve yorumlanması amaçlanmıştır.

Özel kalıp ile çeşitli kalınlıklardaki malzemeler için çeşitli parametrelerde birleştirmeler yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre hem kalıpta hem de SKK parametrelerinde iyileştirmeler ve daha sonrasında da yapılan ön çalışmaların sonucunda tezin ilerleyen bölümlerinde anlatılacak olan çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Gerçekleştirilen kaynak deneylerinin sonrasında çekme deneyleri, mikro sertlik deneyleri ve yorulma deneyleri olan mekanik deneyler ile optik mikroskop, elektron mikroskobu ve EDS analizleri olan metalurjik deneyler yapılmış, tüm detaylar tezin ilerleyen bölümlerinde anlatılmıştır.

BÖLÜM 3

MATERYAL VE METOT

3.1. SKK için Hazırlanan Tezgah ve SKK Birleştirmeleri Hakkında Bilgiler

Tezin Giriş bölümünde belirtildiği üzere yapılan hazırlıklar ve deneysel çalışmalar aşağıda detaylı biçimde anlatılmıştır. Öncelikle, hali hazırda bulunan Üniversal Freze Tezgahı, SKK birleştirmeleri için hazır hale getirilmiştir. Tezgahın elektriksel ve mekanik aksamı gözden geçirilmiş, çalışır durumda olması sağlanmıştır. Sonrasında, birleştirilecek malzemeler için tezgah bağlantı aparatı hazırlanmıştır.

SKK birleştirmeleri için TÜBAP Bilimsel Araştırma Projesi dahilinde temin edilen, çeşitli kalınlıklara sahip 5083 alüminyum alaşımları, deney numuneleri olarak SKK birleştirme işlemine uygun hale getirilmiştir. SKK birleştirme numuneleri, tezin amacına uygun olarak mekanik ve metalurjik deneylere uygun boyutlarda planlanmıştır.

Mekanik ve metalurjik deneyler öncesi, ileriki kısımlarda açıklanacak olan optimum deney parametrelerine sahip SKK birleştirmeleri gerçekleştirilmiştir.

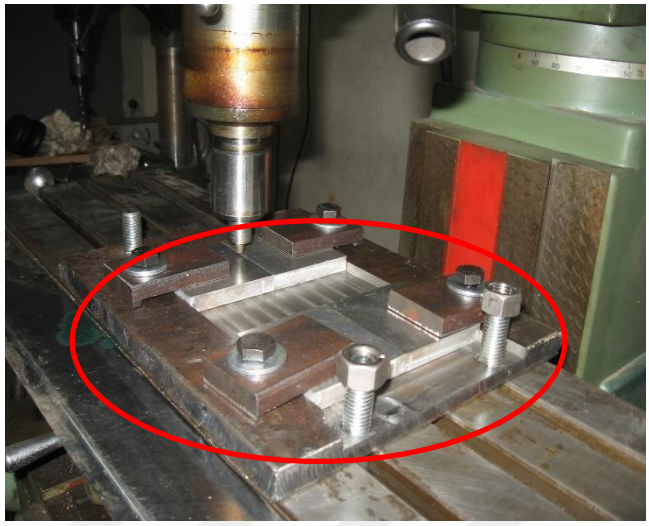
3.1.1. SKK için Tezgah ve Takım Hazırlıkları

Trakya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü Laboratuvarlarında bulunan 1 adet Üniversal Freze Tezgahı, modifiye edilerek SKK Deney Tesisatı haline getirilmiş ve tezgahın çalışırlığı sağlanmıştır (Şekil 3.1 ve Şekil 3.2). Takım olarak, düşük karbon içerikli yüzeyi sementasyon ve nitrürasyon ile sertleştirilebilen AISI 8620 Sementasyon Çeliği satın alınmıştır. Takım kullanımı esnasında, yüzeyde sert iç kısımlarda tokluk istenmesi sebebiyle bu çelik tercih edilmiştir.

Şekil 3.1. SKK için hazırlanan freze tezgahı

Şekil 3.2. SKK için hazırlanan freze tezgahı (yan görünüş)

Başlangıçta; SKK birleştirmeleri için ön deneylerde kullanılmak üzere 1 adet malzeme bağlama aparatı hazırlanmış olup Şekil 3.3'te gösterilmektedir.



Şekil 3.3. Ön deneylerde kullanılan malzeme bağlama aparatı

SKK birleştirmelerinde kullanılmak üzere tasarlanmış olan Şekil 3.4, Şekil 3.5 ve Şekil 3.6'da fotoğrafları verilmiş olan SKK takımları, öncelikle proje kapsamında malzemeleri alındıktan sonra TÜBAP hizmet alımları kaleminden karşılanmak üzere yaptırılmış olup sertlikleri, sertlik ölçme cihazında test edilmiştir.

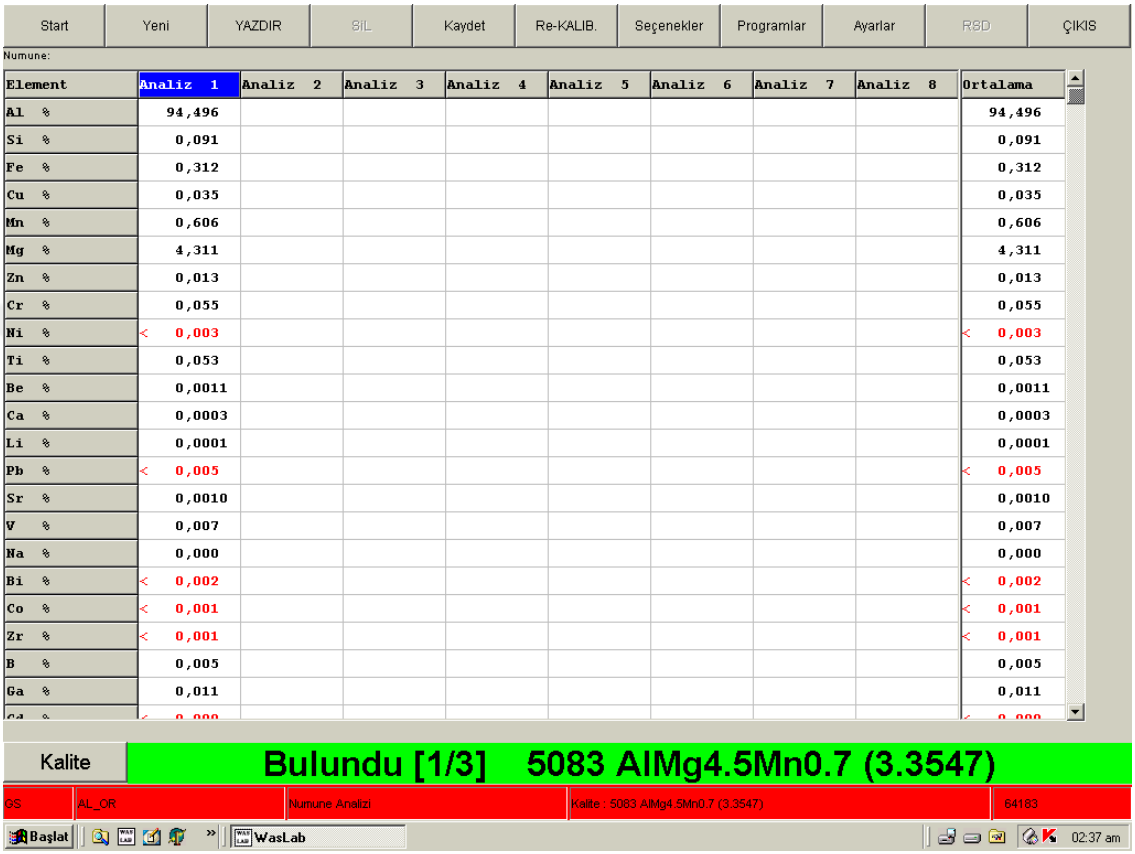
Şekil 3.4. SKK deneylerinde kullanılan takımlar (talaşlı işleme esnasındaki görünüş)

Şekil 3.5. SKK deneylerinde kullanılan takımlar (ısıl işlem öncesi görünüş)

Şekil 3.6. SKK deneylerinde kullanılan takımlar (ısıl işlem sonrası görünüş)

3.1.2. Numune Hazırlama Aşaması

5083 alüminyum alaşımlarından alınan numune için element analizi testi yaptırılmıştır. İlgili değerler ve sonuç raporu Şekil 3.7'de verilmiştir.



Şekil 3.7. 5083 alüminyum alaşımı element analizi test raporu

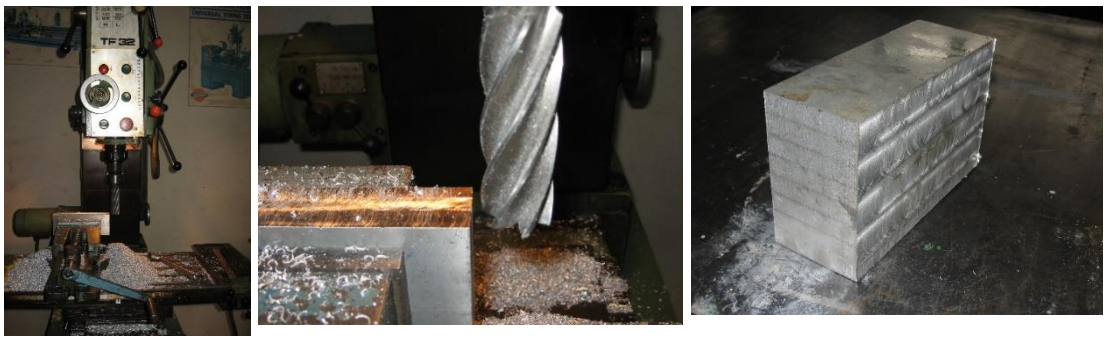
SKK deney parametreleri, tez çalışma programında planladığı üzere daha önceki çalışmalar da göz önünde bulundurularak ve kullanılan freze tezgahının gücü ile kapasitesi dahilinde öncelikle pimin batma derinliği olmak üzere, pimin devir sayısı ve pimin ilerleme hızı şeklinde tespit edilmiştir. İmkanlar dahilinde belirlenen optimum parametrelere ait değerler, Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. SKK Optimum Deney Parametreleri

No	Birleştirme yapılan numune sayısı	n: devir sayısı (dev / dak)	V: ilerleme hızı (mm / dak)
1	3 adet	550	40
2	3 adet		80
3	3 adet	700	40
4	3 adet		80
5	3 adet	800	40
6	3 adet		80
7	3 adet	1400	40
8	3 adet		80

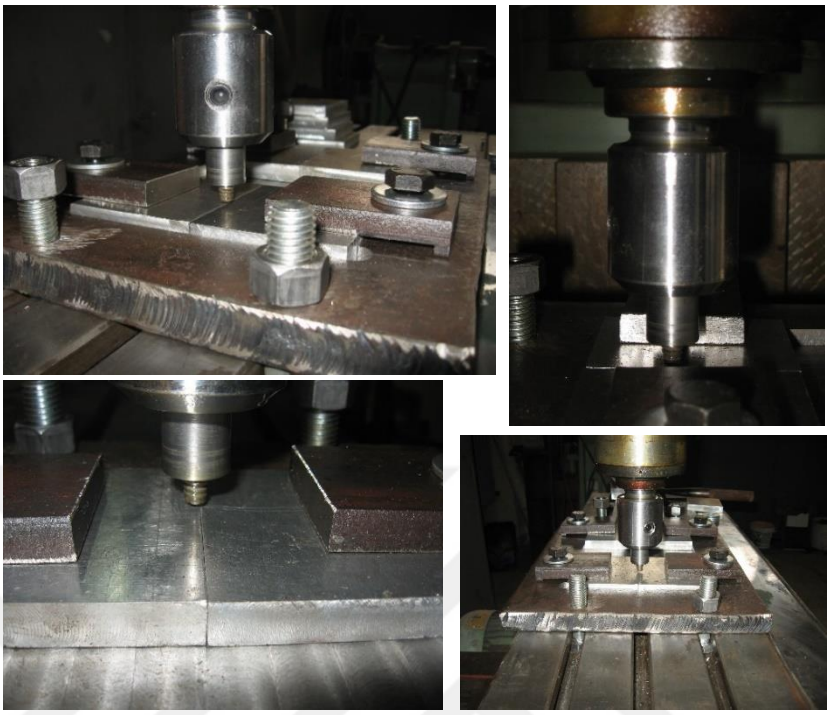
TÜBAP Bilimsel Araştırma Projesi dahilinde deney numuneleri olarak kalınlıkları sırasıyla; 6, 10, 15 ve 20 mm olmak üzere 4 farklı kalınlığa sahip 5083 alüminyum alaşımı temin edilmiştir. Alüminyum malzemelerin SKK işlemine hazırlanmış ve SKK birleştirme numuneleri, tezin amacına uygun olarak mekanik ve metalurjik deneylere uygun boyutlarda planlanmıştır.

SKK deneylerinde kullanılan deney numunelerinin tümü, daha önceden belirlendiği boyutlarda (kalıba uygun biçimde), tasarımları yapılmış ve bu tasarımlar dahilinde Trakya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Atölyesi'nde hazırlanmıştır (Şekil 3.8).

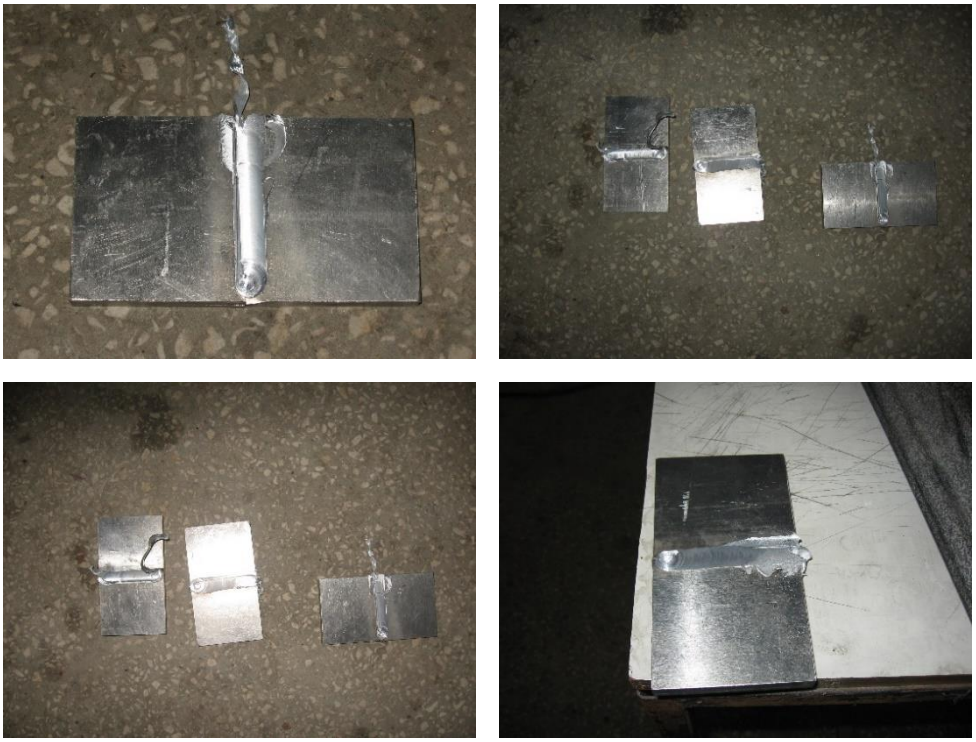


Şekil 3.8. SKK deney numuneleri (imalat aşaması)

Şekil 3.9 ve Şekil 3.10’da numune birleştirme işlemi ve birleştirilen numunelere ait örnek fotoğraflar verilmiştir.



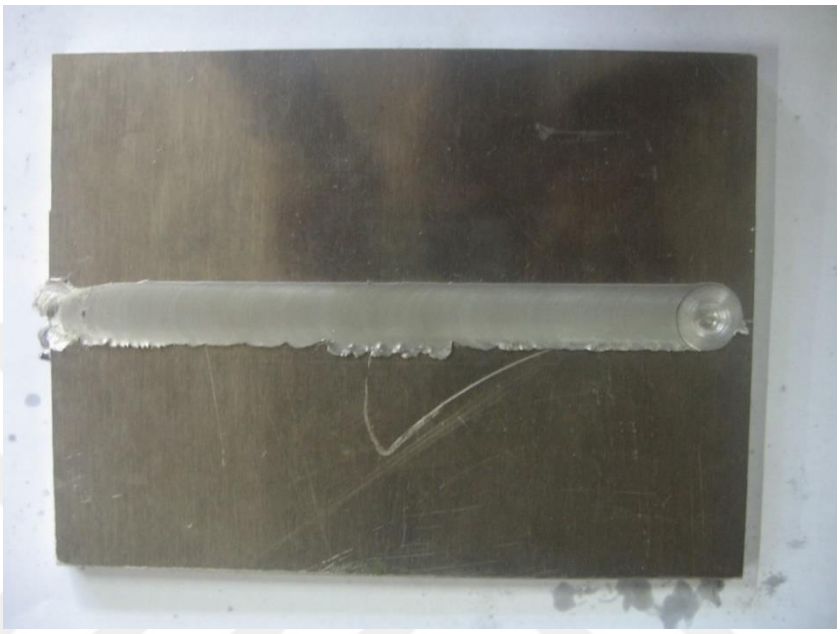
Şekil 3.9. Hazırlık işlemleri ve numune birleştirme işlemi



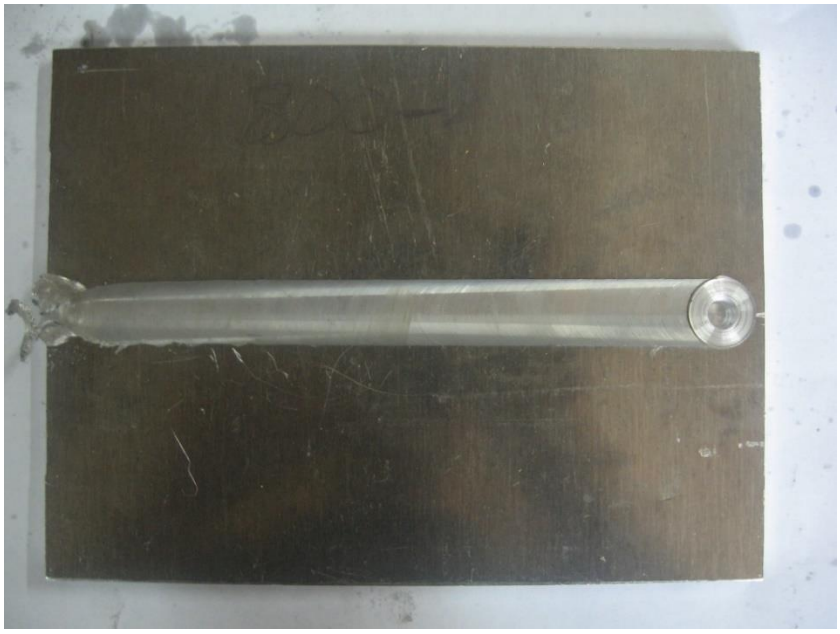
Şekil 3.10. SKK ile birleştirilmiş ön deney numuneleri

3.1.3. SKK Birleştirme Deneyleri

Belirlenen optimum parametrelerde SKK işlemleri gerçekleştirilmiş olup birleştirme örneklerine ait bazı fotoğraflar, Şekil 3.11, Şekil 3.12 ve Şekil 3.13'te verilmiştir.



Şekil 3.11. SKK ile birleştirilmiş numuneler
(40 mm/dak ilerleme hızı, 700 dev/dak devir sayısı)



Şekil 3.12. SKK ile birleştirilmiş numuneler
(40 mm/dak ilerleme hızı, 800 dev/dak devir sayısı)

Şekil 3.13. SKK ile birleştirilmiş numuneler
(40 mm/dak ilerleme hızı, 1400 dev/dak devir sayısı)

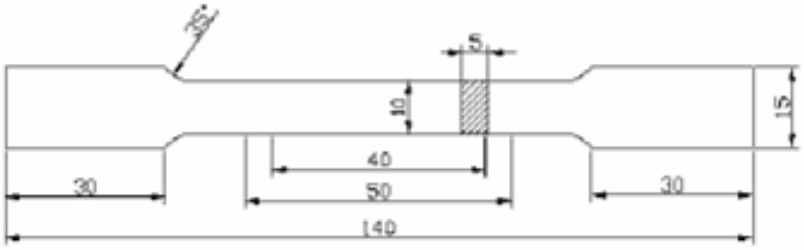
3.2. Mekanik ve Metalurjik Deneyler Hakkında Bilgiler

Bir önceki bölümde belirtilmiş olan ön birleştirme deneyleri sonucunda belirlenen optimum parametreler için numunelerin hazırlığı aşamasına geçilmiştir. Mekanik ve metalurjik deneylerde çekme, yorulma, mikro sertlik ve mikroyapı deneyleri için tüm numunelerin hazırlığı gerçekleştirilmiş ve aşağıdaki bölümlerde teknik detaylar verilmiştir.

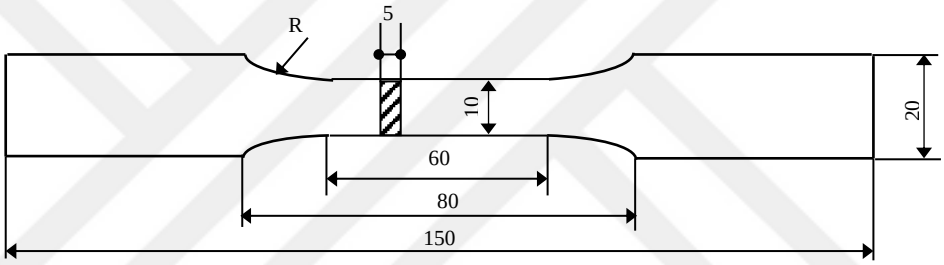
Numune hazırlama aşaması sonrasında; mekanik olarak çekme, yorulma ve mikro sertlik deneyleri ile metalurjik olarak mikroyapısal deneyler gerçekleştirilmiş ve aşağıdaki bölümlerde detaylı bir biçimde açıklanmıştır.

3.2.1. Numune Hazırlama Aşaması

SKK ile birleştirilen numunelerin çekme ve yorulma dayanımlarının belirlenmesi için ve birleştirme bölgesindeki sertlik dağılımı için numunelerin hazırlık aşamasına geçilmiş, numune boyutları tespit edilmiş ve standartlara uygun olarak numuneler hazırlanmıştır. (Şekil 3.14 ve Şekil 3.15)

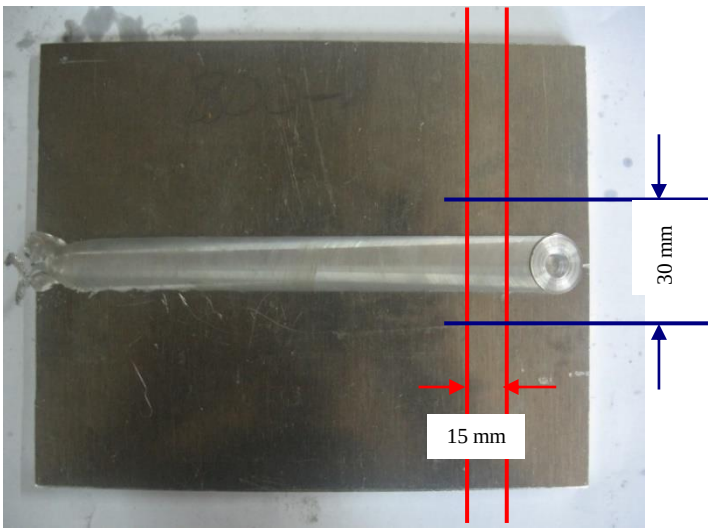


Şekil 3.14. Çekme deneyi numune boyutları



Şekil 3.15. Yorulma deneyi numune boyutları

Mikro sertlik deneyi numune hazırlık aşamaları sırasıyla, "Kesme", "Zımparalama" ve "Parlatma" şeklindedir. Aşağıda detayları açıklanmıştır.



Şekil 3.16. Mikro Sertlik deneyi numune hazırlık aşaması

Kesme İşlemi:

Şekil 3.16’ da gösterildiği gibi, Kaynak eksenine dik yönde 15 mm genişlikte kesilmiştir. Daha sonra yine şekilde gösterildiği gibi kaynak eksenine paralel yönde 30 mm genişlikte kesme işlemleri gerçekleştirilmiştir.

Zımparalama:

Kesilen numuneler aşındırıcı maddeleri silisyum karpit sık kum dağılımlı disk zımparalar ile dönel diskli zımpara cihazlarında sırasıyla; 180, 400 ve 600 numaralı sulu zımparalar ile zımparalanmıştır.

Parlatma:

Zımparalanan numunelerin daha sonra dönel diskli parlatma cihazlarında sırasıyla 250 dev/dak ve 400 dev/dak dönme hızlarında yüzeyleri parlatılmıştır.

Şekil 3.17. Parlatma işleminde kullanılan METKON Forcipol 1V parlatma cihazı

Metalurjik deneyler için kullanılacak mikroyapı deneyi numuneleri için ise yine mikro sertlik deneylerindeki hazırlık aşamaları (Kesme, Zımparalama, Parlatma) uygulanmış ve ilaveten “Dağlama” işlemi de gerçekleştirilmiştir. Dağlama işlemi ile ilgili detaylar aşağıda açıklanmıştır.

Dağlama:

Dağlama işlemi, malzemelerin yüzeyine uygun bir çözelti ile metal mikroskobunda görülebilmesi için muamele edilmesidir. Hazırlanan numuneler, parlatıldıktan sonra Keller ayracı (2 ml HF + 3 ml HCl + 5 ml HNO_3 + 190 ml H_2O) kullanılarak ortalama 15 – 20 saniye süre ile dağlanmışlardır.

3.2.2. Mekanik Özelliklerin İncelenmesi

SKK ile birleştirilen numunelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi için sırasıyla çekme dayanımları, yorulma dayanımları ve mikro sertlik değerleri belirlenmiştir. Tüm bu deneyler için ayrıntılı bilgiler aşağıdaki bölümlerde aktarılmıştır.

3.2.2.1. Çekme Dayanımlarının İncelenmesi

Çekme deneyi, mühendislik malzemelerinin dayanımı hakkında fiziksel özelliklerini belirlemek ve bununla birlikte özelliklerine uygun olarak sınıflandırılmasını sağlamak için kullanılmaktadır. Bu deneyde standartlara uygun olarak hazırlanmış olan numuneler, tek eksenli olacak şekilde sabit bir hız ve sabit bir sıcaklıkta çekilmektedir. Artan çekme kuvveti ile birlikte koparılmaktadır. Çekme deneyi sonucunda genel olarak malzemeye ait çekme dayanımının tespit edilmesi istenmektedir.

Deneyler sonucunda çekme dayanımı aşağıdaki formül ile elde edilmektedir;

$$\sigma_{ç} = \frac{F_{max}}{A_0} \tag{3.1}$$

Formülde yer alan terimler aşağıda verilmiştir;

$\sigma_{ç}$: çekme dayanımı (MPa)

F_{max} : maksimum kuvvet (N)

A_0 : ilk kesit alanı (mm^2)

SKK ile optimum parametrelere göre birleştirilen numunelerden elde edilen çekme numuneleri için deneyler, Makina Mühendisliği Bölümü Laboratuvarları'nda mevcut olan ve Şekil 3.18'de gösterilen INSTRON 8501 dinamik test makinasında gerçekleştirilmiştir.

Şekil 3.18. INSTRON 8501 dinamik test makinası

SKK ile birleştirilen ve işlenen numunelere uygulanan çekme deneylerinden elde edilen tüm sonuçlar bir sonraki bölümde açıklanacaktır.

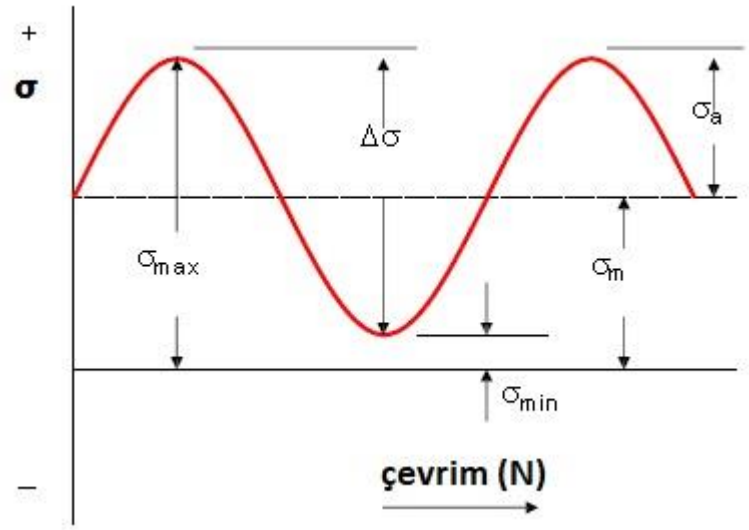
3.2.2.2. Yorulma Dayanımlarının İncelenmesi

Yorulma deneyi de bilindiği üzere çekme deneyine benzer şekilde mühendislik malzemelerinin dayanımı hakkında fiziksel özelliklerini belirlemek ve bununla birlikte özelliklerine uygun olarak sınıflandırılmasını sağlamak için kullanılmaktadır.

Tekrarlanan gerilmeler altında çalışan mühendislik malzemelerinde, uygulanan gerilmelerin statik dayanımlarından küçük olmasına rağmen belirli bir tekrar sayısında yüzeylerde bir çatlak oluşması ve bu çatlağın kırılmaya neden olması olayına "Yorulma" denir. Endüstride kullanılan makina parçalarında görülen hasarların önemli bir kısmı yorulma olayının sonucunda oluşmaktadır. Yeterli miktarda gerilme ile uygulanan gerilmenin sürekliliği ve tekrarlı olması, yorulma hasarına neden olan başlıca faktörler

olup diğer faktörler, gerilme yığılması, kalıntı gerilmeler, birleşik gerilmeler, korozyon, sıcaklık, aşırı yük ve metalurjik yapıdır.

Yorulma deneyinde standartlara uygun olarak hazırlanmış olan numuneler, tek eksenli olacak şekilde sabit bir frekans (Hz) ve tekrarlı gerilmeler altında yorulmaya maruz bırakılmaktadır. Yorulan malzemede, çatlak oluşumu sebebiyle kırılmakta ve hasar oluşmaktadır. Çekme gerilmesi "+" bölgede, basma gerilmesi ise "-" bölgede gösterilmektedir.



Şekil 3.19. Yorulma deneyinde gerilme – zaman eğrisi

Yorulma deneyinde gerilme – zaman eğrisindeki terimler aşağıda verilmiştir;

- N (Çevrim sayısı): gerilme – zaman eğrisinde periyodik olarak tekrarlanan en küçük parça bir çevrime eşittir.
- σ_{max} (maksimum gerilme): uygulanan en yüksek gerilme değeri
- σ_{min} (minimum gerilme): uygulanan en düşük gerilme değeri
- σ_m (ortalama gerilme): minimum ve maksimum gerilmelerin ortalaması
- $\Delta\sigma$ (gerilme aralığı): maksimum ve minimum gerilmeler arasındaki fark
- σ_a (gerilme genliği): maksimum ve minimum gerilmelerin ortalaması ile ortalama gerilme arasındaki fark
- R (gerilme oranı): minimum gerilmenin maksimum gerilmeye oranı
- A (genlik oranı): gerilme genliğinin ortalama gerilmeye oranı

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max}+\sigma_{min}}{2} \quad (3.2)$$

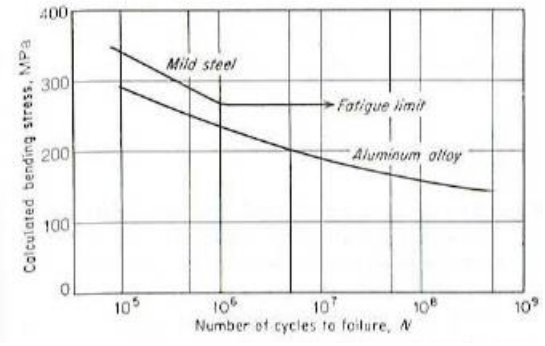
$$\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min} \quad (3.3)$$

$$\sigma_a = \frac{\Delta\sigma}{2} = \frac{\sigma_{max}-\sigma_{min}}{2} \quad (3.4)$$

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \quad (3.5)$$

$$A = \frac{\sigma_a}{\sigma_m} = \frac{1-R}{1+R} \quad (3.6)$$

Yorulma deneyi sonucunda genel olarak malzemeye ait Wöhler diyagramının çıkarılması istenmektedir. Wöhler diyagramı, gerilme miktarı ile hasara sebep olacak çevrim sayısının bir grafiğidir. Tipik yorulma eğrilerine sahip bir Wöhler diyagramının şematik görüntüsü Şekil 3.20'de verilmiştir;

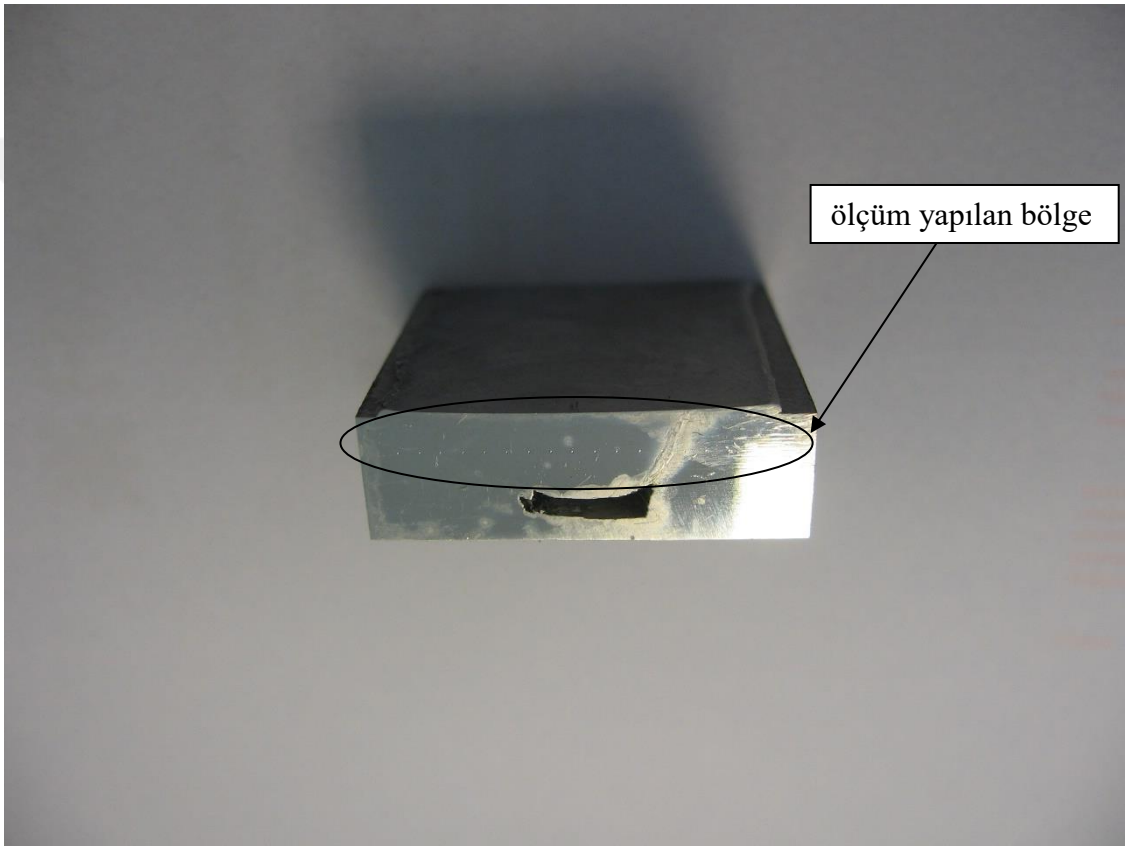


Şekil 3.20. Tipik bir Wöhler diyagramı örneği

Tüm yorulma deneyleri de çekme deneylerinde olduğu gibi Şekil 3.18'de gösterilen INSTRON 8501 dinamik test makinasında gerçekleştirilmiştir. Ham olarak satın alındığı gibi (esas malzeme) ve SKK ile birleştirilen ve işlenen numunelere uygulanan yorulma deneylerinden elde edilen tüm sonuçlar bir sonraki bölümde açıklanacaktır.

3.2.2.3. Mikro Sertliklerin İncelenmesi

Numune hazırlama aşamasında belirtilen “Kesme”, “Zımparalama” ve “Parlatma” aşamalarından sonra her bir parametre için ayrı ayrı olmak üzere numuneler, HEMA Endüstri A.Ş. firmasına ait malzeme laboratuvarlarında bulunan Zwick / Roell marka Sertlik Ölçme Cihazı’nda test edilmiştir. Kaynak ekseninden uzaklıklara göre mikro sertlik değerleri tespit edilmiştir.



Şekil 3.21. Mikro sertlik (HV 0.5) ölçümü makro fotoğrafı

Mikro sertlik deneylerinden elde edilen tüm sonuçlar bir sonraki bölümde açıklanacaktır.

3.2.3. Mikroyapıların İncelenmesi

Numune hazırlama aşamasında belirtilen “Kesme”, “Zımparalama”, “Parlatma” ve “Dağlama” aşamalarından sonra mikroyapısal inceleme aşamasına geçilmiştir.

Öncelikle, Trakya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Malzeme Laboratuvarı'nda bulunan XJP-6A model Trinoküler Ters Işıklı Metal Mikroskobu ile büyütme oranı 10x, 250x ve 50x, 500x olmak üzere DYKB, TMEB ve IEB detaylı bir şekilde incelenmiştir. Elde edilen görüntüler VITEC marka video-kamera aracılığıyla dijital ortama aktarılmıştır.

Şekil 3.22. Mikroyapı inceleme işleminde kullanılan XJP-6A model metal mikroskobu

Şekil 3.23. Mikroyapı inceleme işleminde kullanılan VITEC görüntüleme sistemi

Metal mikroskobundaki çeşitli büyütme oranları ile gerçekleştirilen görüntüleme işlemlerinin sonrasında mikroyapı incelemeleri ve EDS analizleri için Trakya Üniversitesi Teknoloji Araştırma ve Geliştirme Uygulama ve Araştırma Merkezi (TÜTAGEM) Laboratuvarlarında bulunan Zeiss Evo LS10 model elektron mikroskobunda, SEM ve Enerji Dağılımlı X-Ray (EDX) analizleri gerçekleştirilmiştir.

Şekil 3.24. Mikroyapı ve EDS inceleme işleminde kullanılan Evo LS10 model elektron mikroskobu

Mikroyapı görüntülemelerinden elde edilen tüm sonuçlar bir sonraki bölümde açıklanacaktır.

3.2.4. Verilerin İstatistiksel Analizi

Mekanik deneylerden elde edilen veriler, istatistiksel analiz kapsamında güvenilirlik ve geçerlilik için SPSS paket programı ile incelenmiştir. SPSS'in bir bileşeni olan Regresyon Analizi Modülü ile çekme, sertlik ve yorulma deney sonuçlarına göre bir dizi istatistiksel analiz çalışmaları yapılmıştır.

Regresyon Analizi Yaklaşımı'nın temeli, optimizasyon parametresi (η) için basitleştirilmiş bir doğrusal model varsayımıdır.

$$\eta = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \cdots \quad (3.7)$$

formülü ile ifade edilmektedir.

x_1, x_2, … η'nün bağlı olduğu faktörler olup β_0, β_1, β_2, … karşılık gelen bilinmeyenlerin "doğru" değerleridir.

Sonlu sayıda denemeden oluşan bir deneyin sonuçlarından sonrasında genellikle,

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \cdots \quad (3.8)$$

formülü ile ifade edilen bir doğrusal regresyon denklemine uydurulan, "y" nin yanıt fonksiyonu ve b_s'lerin β'ların "tahmini" değerleri olduğu, β katsayılarının örnek tahminlerine ulaşılabilir.

Basit bir ifadeyle, her katsayı karşılık gelen faktörün optimizasyon parametresi ile ifade edilen gerilme dayanımının kalitesi üzerindeki etkisini temsil eder. Parametre optimizasyonu, deneylerin faktöriyel tasarımı kullanılarak gerçekleştirilir (Özel, Şahin & Akdoğan, 2008).

SPSS paket programı ile elde edilen tüm sonuçlar bir sonraki bölümde açıklanacaktır.

BÖLÜM 4

SONUÇLAR

4.1. Mekanik Deneylerin Sonuçları

Çalışmalar kapsamında önceki bölümde temel bilgileri açıklanan çekme, yorulma ve mikro sertlik deneylerine ait deney sonuçları aşağıda üç alt başlık altında verilmiştir.

4.1.1. Çekme Deneyi Sonuçları

Çekme deneyleri INSTRON 8501 dinamik test makinasında önceki çalışmalar da dikkate alınarak gerçekleştirilmiş ve sonuçlar aşağıdaki çizelgelerde verilmiştir.

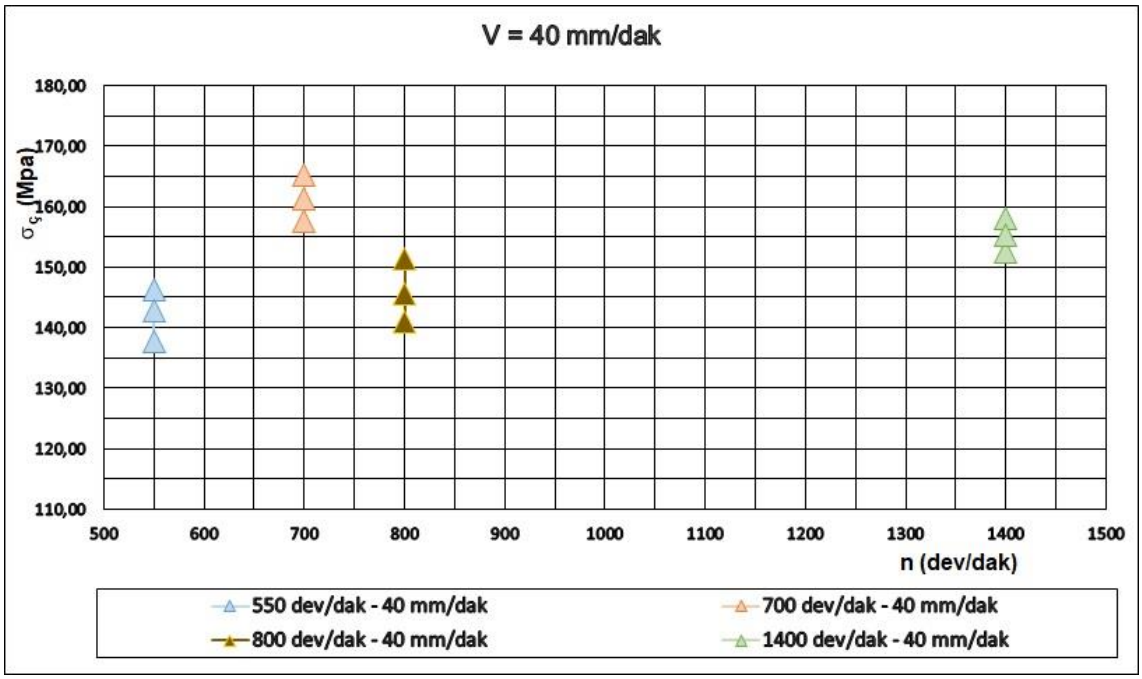
Çizelge 4.1. Çekme deneyi sonuçları (V = 40 mm/dak)

No	n (dev/dak)	a (mm)	b (mm)	A_0 = a.b (mm^2)	F_{max} (N)	$\sigma_ç = F_{max} / A_0$ (MPa)
1	550	10	5	50	7309	146,18
2	550	10	5	50	6888	137,76
3	550	10	5	50	7135	142,70
1	700	10	5	50	8070	161,40
2	700	10	5	50	7882	157,64
3	700	10	5	50	8260	165,20
1	800	10	5	50	7050	141,00
2	800	10	5	50	7568	151,36
3	800	10	5	50	7280	145,60
1	1400	10	5	50	7620	152,40
2	1400	10	5	50	7907	158,14
3	1400	10	5	50	7767	155,34

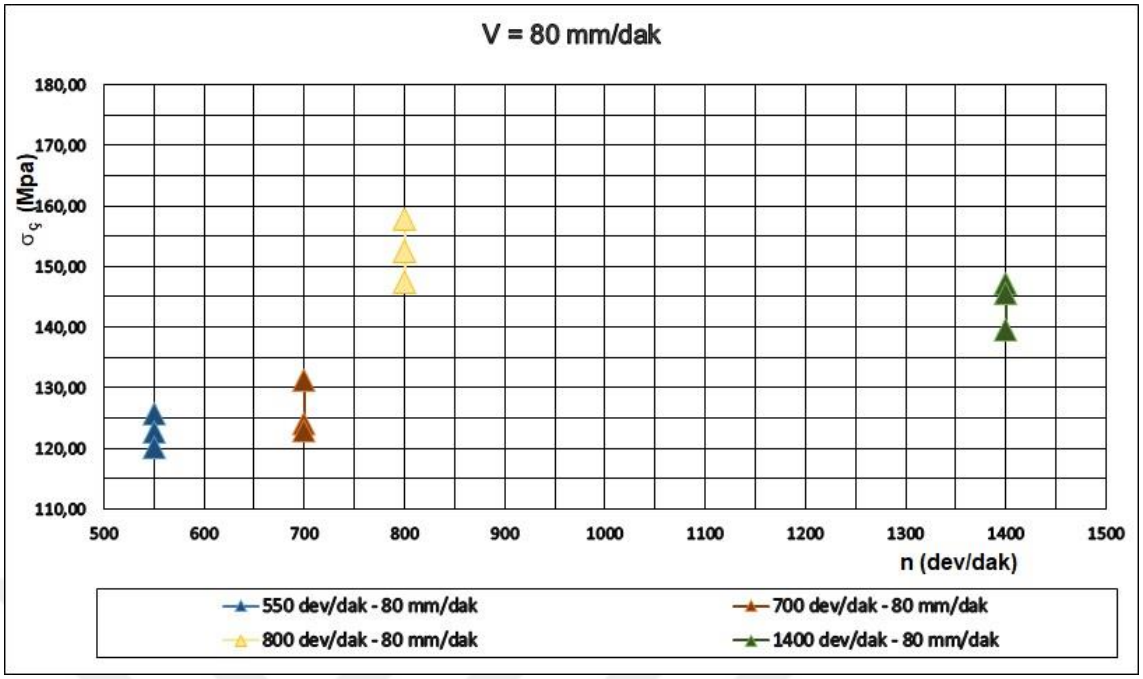
Çizelge 4.2. Çekme deneyi sonuçları (V = 80 mm/dak)

No	n (dev/dak)	a (mm)	b (mm)	$A_0 = a.b$ (mm^2)	F_{max} (N)	$\sigma_ç = F_{max} / A_0$ (MPa)
1	550	10	5	50	6283	125,66
2	550	10	5	50	6139	122,78
3	550	10	5	50	6007	120,14
1	700	10	5	50	6562	131,24
2	700	10	5	50	6200	124,00
3	700	10	5	50	6150	123,00
1	800	10	5	50	7375	147,50
2	800	10	5	50	7894	157,88
3	800	10	5	50	7630	152,60
1	1400	10	5	50	7358	147,16
2	1400	10	5	50	6982	139,64
3	1400	10	5	50	7281	145,62

40 mm/dak ve 80 mm/dak ilerleme hızlarına ait çekme dayanımı ($\sigma_ç$) – devir sayısı (dev/dak) sonuçlarına ait grafikler, aşağıdaki şekillerde verilmiştir.

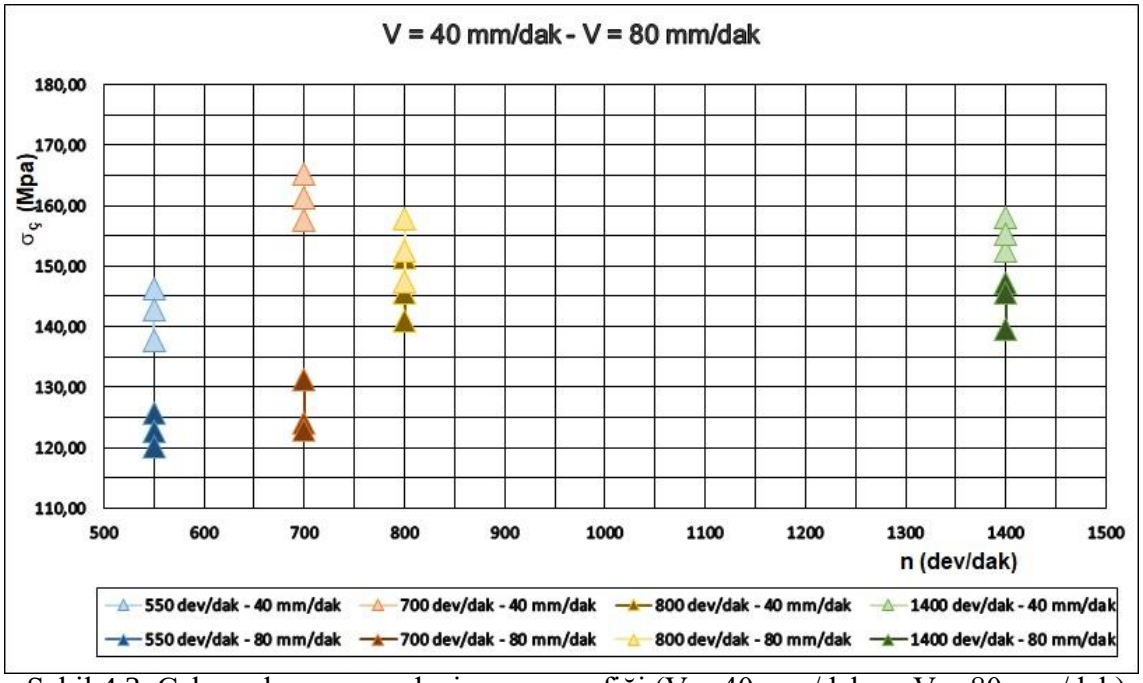


Şekil 4.1. Çekme dayanımı – devir sayısı grafiği (V = 40 mm/dak)



Şekil 4.2. Çekme dayanımı – devir sayısı grafiği (V = 80 mm/dak)

Karşılaştırma yapılabilmesi açısından 40 mm/dak ve 80 mm/dak ilerleme hızında elde edilen çekme dayanımı ($\sigma_ç$) – devir sayısı (dev/dak) sonuçlarına ait grafikler bir arada verilmiştir.



Şekil 4.3. Çekme dayanımı – devir sayısı grafiği (V = 40 mm/dak ve V = 80 mm/dak)

Deney sonuçlarına göre, çekme dayanımı değerlerinin düşük ilerleme hızları ve yüksek devir sayıları için arttığı görülmektedir. Başka bir deyişle belirtilen ilerleme hızları ve devir sayılarının çekme dayanımları açısından numuneleri kaynakla birleştirmekte yeterli olduğu görülmüştür. Maksimum çekme dayanımı değerleri, 700 dev/dak – 40 mm/dak ile 800 dev/dak – 80 mm/dak ile gerçekleştirilen deneyler için elde edilmiştir. 40 mm/dak ve 80 mm/dak ilerleme hızı için 550 dev/dak ile gerçekleştirilen deneylerde çekme dayanımlarının diğer deneylere göre düşük olduğu, 1400 dev/dak ile gerçekleştirilen deneylerde de 40 mm/dak ilerleme hızları için daha iyi değerler elde edildiği belirlenmiştir. Ayrıca, ilerleme hızlarının da birleştirme için etkili olduğu ortaya çıkmıştır.

4.1.2. Yorulma Deneyi Sonuçları

Yorulma deneyleri INSTRON 8501 dinamik test makinasında önceki çalışmalar da dikkate alınarak ve aşağıdaki deney parametreleri kullanılarak gerçekleştirilmiş, sonuçlar aşağıdaki çizelgelerde verilmiştir.

Deney Parametreleri:

Test metodu	: eksenel gerilmeli yorulma deneyi – dinamik test
Test aralığı	: çekme – çekme bölgesi / sinüzoidal eğri
Ölçüm aralığı (gerilme)	: 150 ± 25 MPa ~ 75 ± 25 MPa
Genlik (gerilme)	: deney süresince sabit (± 25 MPa)
Ölçüm aralığı (kuvvet)	: 7500 ± 1250 N ~ 3750 ± 1250 N
Çalışma hızı (frekans)	: 15 Hertz
Boyutlar	: Şekil 3.15'te verilmiştir.

Ölçüm yapılan numuneler: Aşağıda belirtilen grupların her biri için 12'şer adet

1. grup:
- 550 dev / dak – 40 mm / dak
- 550 dev / dak – 80 mm / dak

2. grup:

- 700 dev / dak – 40 mm / dak
- 700 dev / dak – 80 mm / dak

3. grup:

- 800 dev / dak – 40 mm / dak
- 800 dev / dak – 80 mm / dak

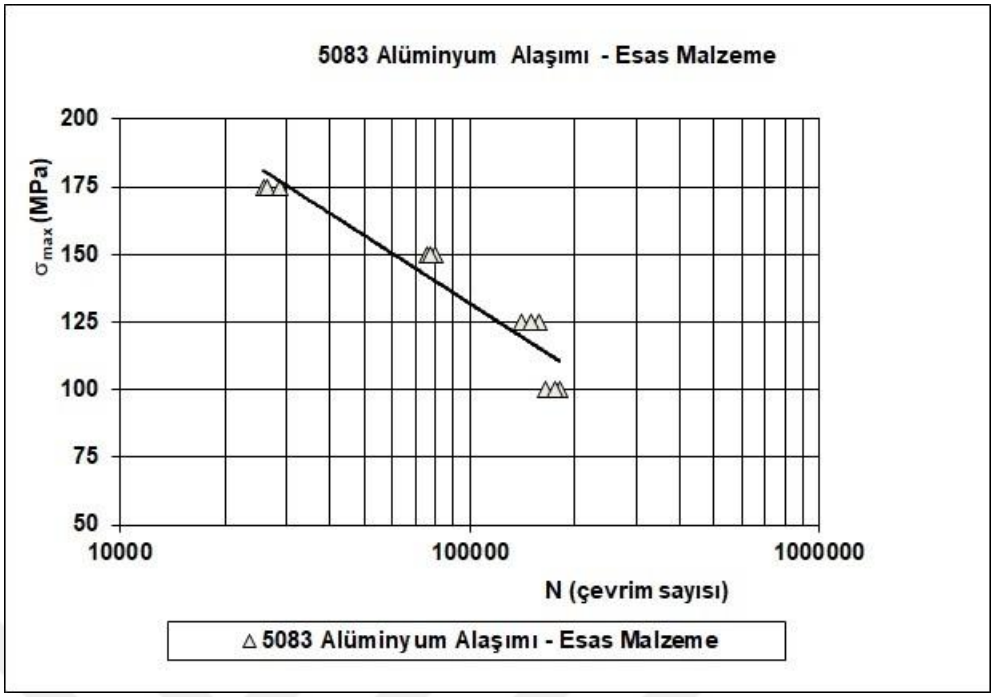
4. grup:

- 1400 dev / dak – 40 mm / dak
- 1400 dev / dak – 80 mm / dak

Çizelge 4.3. Esas malzeme yorulma deneyi sonuçları

No	Malzeme	a (mm)	b (mm)	A_0 = a.b (mm^2)	σ_{max} = F_{max} / A_0 (MPa)	F_{max} (N)	F_{genlik} (N)	Çevrim sayısı (N)
1	Esas malzeme	10	5	50	175	8750	1250	25831
2	Esas malzeme	10	5	50	175	8750	1250	26532
3	Esas malzeme	10	5	50	175	8750	1250	28827
4	Esas malzeme	10	5	50	150	7500	1250	75488
5	Esas malzeme	10	5	50	150	7500	1250	79475
6	Esas malzeme	10	5	50	150	7500	1250	77543
7	Esas malzeme	10	5	50	125	6250	1250	140721
8	Esas malzeme	10	5	50	125	6250	1250	157571
9	Esas malzeme	10	5	50	125	6250	1250	149550
10	Esas malzeme	10	5	50	100	5000	1250	180540
11	Esas malzeme	10	5	50	100	5000	1250	165209
12	Esas malzeme	10	5	50	100	5000	1250	174802

Esas malzemeye ait yorulma deneyi sonuçları Şekil 4.4'te verilmiştir.



Şekil 4.4. Yorulma dayanımı grafiği (Esas malzeme)

Çizelge 4.4. 550 dev/dak – 40 mm/dak için yorulma deneyi sonuçları

No	Devir sayısı (dev/dak)	a (mm)	b (mm)	A_0 = a.b (mm^2)	σ_{max} = F_{max} / A_0 (MPa)	F_{max} (N)	F_{genlik} (N)	Çevrim sayısı (N)
1	550	10	5	50	150*	7500	1250	405
2	550	10	5	50	150*	7500	1250	701
3	550	10	5	50	150*	7500	1250	1153
4	550	10	5	50	125	6250	1250	10293
5	550	10	5	50	125	6250	1250	11965
6	550	10	5	50	125	6250	1250	11254
7	550	10	5	50	100	5000	1250	30163
8	550	10	5	50	100	5000	1250	28251
9	550	10	5	50	100	5000	1250	31205
10	550	10	5	50	75	3750	1250	67014
11	550	10	5	50	75	3750	1250	65178
12	550	10	5	50	75	3750	1250	62508

Not: *150 MPa maksimum gerilmedeki çevrim sayısı değerleri çok düşük olarak elde edildiği için bundan sonraki deneylerde bu dayanım değeri kullanılmamıştır.

Çizelge 4.5. 700 dev/dak – 40 mm/dak için yorulma deneyi sonuçları

No	Devir sayısı (dev/dak)	a (mm)	b (mm)	A_0 = a.b (mm^2)	σ_{max} = F_{max} / A_0 (MPa)	F_{max} (N)	F_{genlik} (N)	Çevrim sayısı (N)
1	700	10	5	50	125	6250	1250	12903
2	700	10	5	50	125	6250	1250	13862
3	700	10	5	50	125	6250	1250	12765
4	700	10	5	50	100	5000	1250	33174
5	700	10	5	50	100	5000	1250	30858
6	700	10	5	50	100	5000	1250	34206
7	700	10	5	50	75	3750	1250	52102
8	700	10	5	50	75	3750	1250	54301
9	700	10	5	50	75	3750	1250	53208

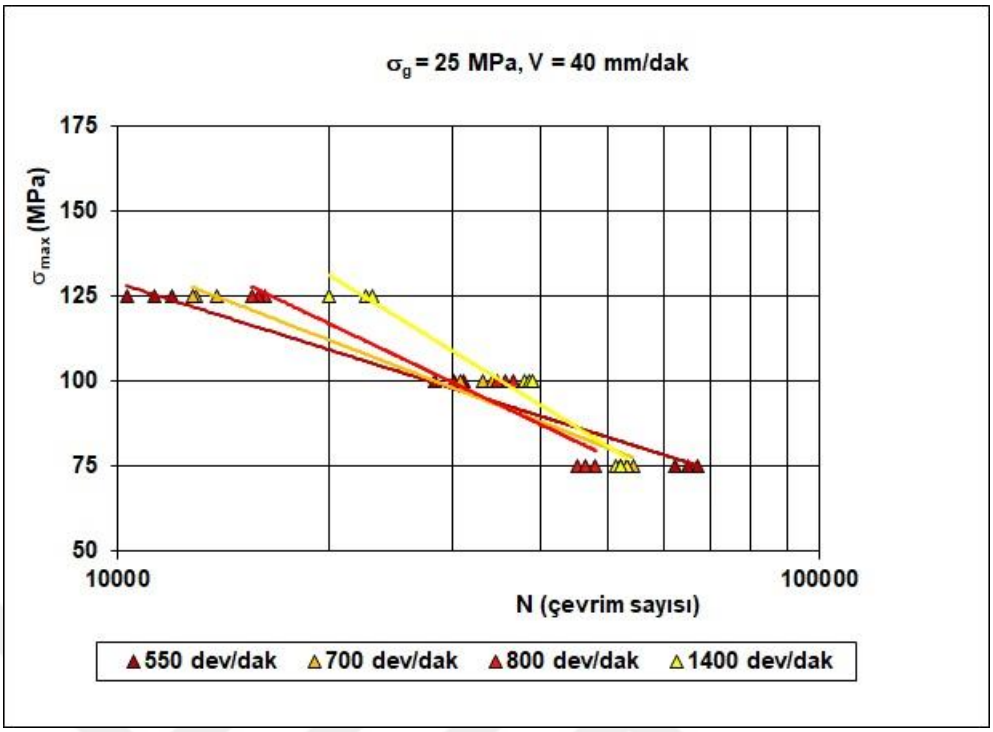
Çizelge 4.6. 800 dev/dak – 40 mm/dak için yorulma deneyi sonuçları

No	Devir sayısı (dev/dak)	a (mm)	b (mm)	A_0 = a.b (mm^2)	σ_{max} = F_{max} / A_0 (MPa)	F_{max} (N)	F_{genlik} (N)	Çevrim sayısı (N)
1	800	10	5	50	125	6250	1250	16202
2	800	10	5	50	125	6250	1250	15897
3	800	10	5	50	125	6250	1250	15508
4	800	10	5	50	100	5000	1250	36723
5	800	10	5	50	100	5000	1250	35711
6	800	10	5	50	100	5000	1250	34786
7	800	10	5	50	75	3750	1250	48014
8	800	10	5	50	75	3750	1250	45162
9	800	10	5	50	75	3750	1250	46503

Çizelge 4.7. 1400 dev/dak – 40 mm/dak için yorulma deneyi sonuçları

No	Devir sayısı (dev/dak)	a (mm)	b (mm)	A_0 = a.b (mm^2)	σ_{max} = F_{max} / A_0 (MPa)	F_{max} (N)	F_{genlik} (N)	Çevrim sayısı (N)
1	1400	10	5	50	125	6250	1250	20007
2	1400	10	5	50	125	6250	1250	22596
3	1400	10	5	50	125	6250	1250	23013
4	1400	10	5	50	100	5000	1250	38028
5	1400	10	5	50	100	5000	1250	38610
6	1400	10	5	50	100	5000	1250	39117
7	1400	10	5	50	75	3750	1250	53201
8	1400	10	5	50	75	3750	1250	51305
9	1400	10	5	50	75	3750	1250	52156

40 mm/dak ilerleme hızı için elde edilen yorulma dayanımı sonuçları, “maksimum gerilme – çevrim sayısı (σ_{max} – N)” şeklinde Şekil 4.5’te verilmiştir.



Şekil 4.5. Maksimum gerilme – çevrim sayısı (σ_{max} – N) grafiği (σ_g = 25 MPa, V = 40 mm/dak)

Çizelge 4.8. 550 dev/dak – 80 mm/dak için yorulma deneyi sonuçları

No	Devir sayısı (dev/dak)	a (mm)	b (mm)	A_0 = a.b (mm^2)	σ_{max} = F_{max} / A_0 (MPa)	F_{max} (N)	F_{genlik} (N)	Çevrim sayısı (N)
1	550	10	5	50	125	6250	1250	12715
2	550	10	5	50	125	6250	1250	10906
3	550	10	5	50	125	6250	1250	11008
4	550	10	5	50	100	5000	1250	22154
5	550	10	5	50	100	5000	1250	23241
6	550	10	5	50	100	5000	1250	20148
7	550	10	5	50	75	3750	1250	47223
8	550	10	5	50	75	3750	1250	40208
9	550	10	5	50	75	3750	1250	41013

Çizelge 4.9. 700 dev/dak – 80 mm/dak için yorulma deneyi sonuçları

No	Devir sayısı (dev/dak)	a (mm)	b (mm)	A_0 = a.b (mm^2)	σ_{max} = F_{max} / A_0 (MPa)	F_{max} (N)	F_{genlik} (N)	Çevrim sayısı (N)
1	700	10	5	50	125	6250	1250	14853
2	700	10	5	50	125	6250	1250	15501
3	700	10	5	50	125	6250	1250	13998
4	700	10	5	50	100	5000	1250	31023
5	700	10	5	50	100	5000	1250	30904
6	700	10	5	50	100	5000	1250	32021
7	700	10	5	50	75	3750	1250	58903
8	700	10	5	50	75	3750	1250	54827
9	700	10	5	50	75	3750	1250	53892

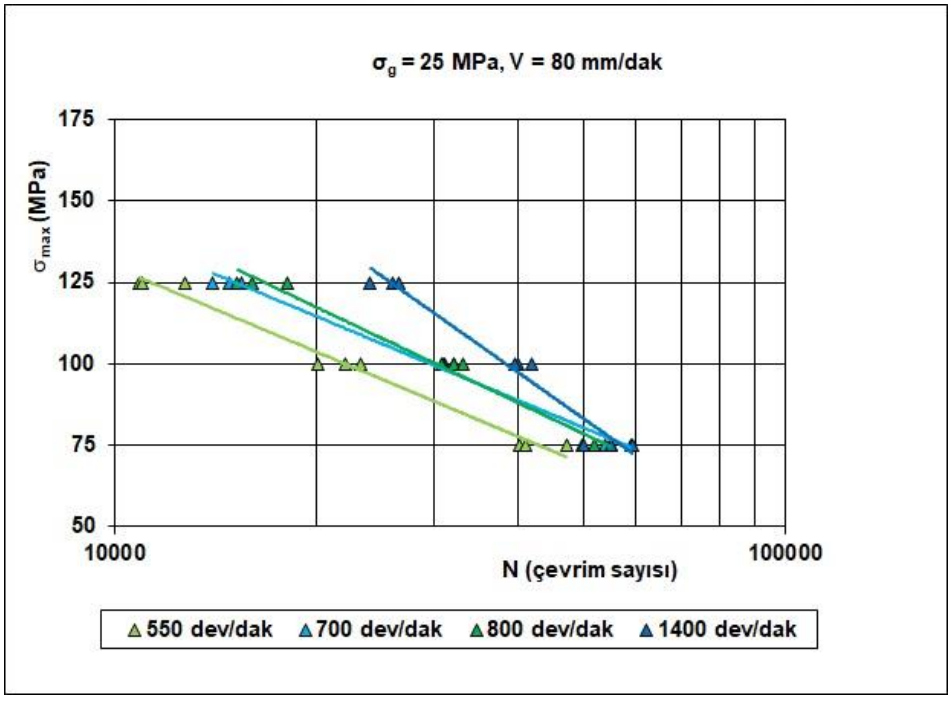
Çizelge 4.10. 800 dev/dak – 80 mm/dak için yorulma deneyi sonuçları

No	Devir sayısı (dev/dak)	a (mm)	b (mm)	A_0 = a.b (mm^2)	σ_{max} = F_{max} / A_0 (MPa)	F_{max} (N)	F_{genlik} (N)	Çevrim sayısı (N)
1	800	10	5	50	125	6250	1250	15227
2	800	10	5	50	125	6250	1250	18055
3	800	10	5	50	125	6250	1250	16023
4	800	10	5	50	100	5000	1250	32028
5	800	10	5	50	100	5000	1250	33071
6	800	10	5	50	100	5000	1250	30806
7	800	10	5	50	75	3750	1250	55072
8	800	10	5	50	75	3750	1250	49812
9	800	10	5	50	75	3750	1250	52029

Çizelge 4.11. 1400 dev/dak – 80 mm/dak için yorulma deneyi sonuçları

No	Devir sayısı (dev/dak)	a (mm)	b (mm)	A_0 = a.b (mm^2)	σ_{max} = F_{max} / A_0 (MPa)	F_{max} (N)	F_{genlik} (N)	Çevrim sayısı (N)
1	1400	10	5	50	125	6250	1250	24053
2	1400	10	5	50	125	6250	1250	26018
3	1400	10	5	50	125	6250	1250	26501
4	1400	10	5	50	100	5000	1250	39982
5	1400	10	5	50	100	5000	1250	39564
6	1400	10	5	50	100	5000	1250	42015
7	1400	10	5	50	75	3750	1250	59211
8	1400	10	5	50	75	3750	1250	49995
9	1400	10	5	50	75	3750	1250	55008

80 mm/dak ilerleme hızı için elde edilen yorulma dayanımı sonuçları, "maksimum gerilme – çevrim sayısı (σ_{max} – N)" şeklinde Şekil 4.6'da verilmiştir.



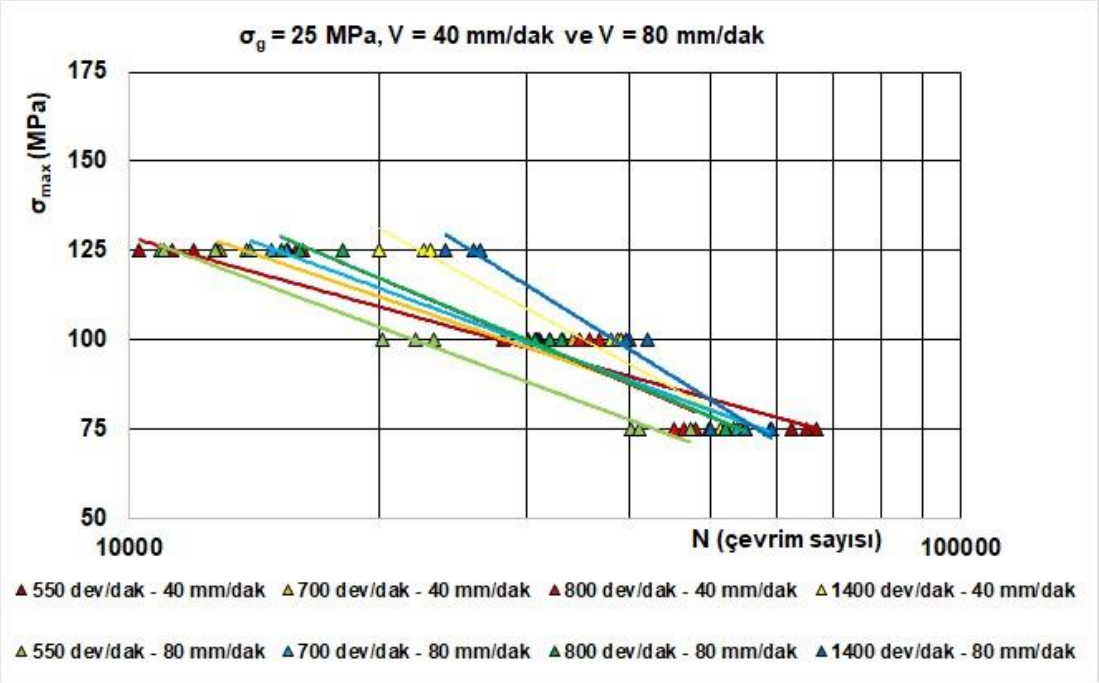
Şekil 4.6. Maksimum gerilme – çevrim sayısı (σ_{max} – N) grafiği (σ_g = 25 MPa, V = 80 mm/dak)

σ_g = 25 MPa sabit gerilme genliği ile gerçekleştirilen tüm yorulma deneylerinde, V = 40 mm/dak ve V = 80 mm/dak farklı ilerleme hızı ve 550 dev/dak, 700 dev/dak, 800 dev/dak ve 1400 dev/dak devir sayısıyla birleştirilmiş numuneler olmak üzere 8 farklı parametre için yorulma dayanımları incelenmiştir.

Deney sonuçlarına göre, yorulma dayanımı değerlerinin her iki grafikte de düşük devir sayısı (550 dev/dak) ile birleştirilmiş olan numunelerin, orta devir sayısı (700 dev/dak ile 800 dev/dak) ve yüksek devir sayısı (1400 dev/dak) ile birleştirilmiş olan numunelere göre daha erken çatlak oluşarak kırıldığı tespit edilmiştir. Bunun nedeninin, SKK'nda bağ oluşumu için yeterli miktarda karıştırmanın sağlanamamasından kaynaklandığı düşünülebilir. Yorulma deneylerinde diğerlerine kıyasla en iyi sonuçların, her iki ilerleme hızı için de 800 dev/dak ve 1400 dev/dak ile birleştirilen numuneler için elde edildiği ortaya çıkmıştır.

Ayrıca, ilerleme hızlarının da çekme dayanımlarında olduğu gibi birleştirme için etkili olduğu ortaya çıkmıştır. İlerleme hızları arttıkça grafiklerden de anlaşılacağı üzere daha uzun çevrim sayılarına ulaşılmaktadır.

Şekil 4.7'de yorulma dayanımı değerlerinin daha iyi kıyaslanması amacıyla 40 mm/dak ve 80 mm/dak için elde edilen değerler bir arada verilmiştir.



Şekil 4.7. Maksimum gerilme – çevrim sayısı (σ_{max} – N) grafiği
(σ_g = 25 MPa, V = 40 mm/dak ve V = 80 mm/dak)

Yorulma deneyleri sonucunda elde edilen kırılma yüzeyleri incelendiğinde yetersiz birleşme ve kaynak ilerleme izlerinin, numunelerde çentik etkisi yaparak çatlak oluşumuna sebebiyet verdiği ve daha kısa sürede kırılmaya neden olduğu ortaya çıkmıştır.

4.1.3. Mikro Sertlik Deneyi Sonuçları

Mikro sertlik deneyleri için, kesme, zımparalama ve parlatma işlemleri tamamlanan numuneler, Zwick / Roell marka Sertlik Ölçme Cihazı'nda önceki çalışmalar da dikkate alınarak ve aşağıdaki deney parametreleri kullanılarak gerçekleştirilmiş, sonuçlar aşağıdaki çizelgelerde verilmiştir.

Deney Parametreleri:

Test Metodu	: Vickers Hardness (HV)
Yükleme Adımı	: HV 0,5
Test Yükü	: 4,903 N
Objektif Lens	: 20 : 1
Sertlik Ölçüm Aralığı	: 1 mm

Ölçüm yapılan numuneler: Aşağıda belirtilen grupların her biri için 15'er adet

- 550 dev / dak – 40 mm / dak
- 550 dev / dak – 80 mm / dak
- 700 dev / dak – 40 mm / dak
- 700 dev / dak – 80 mm / dak
- 800 dev / dak – 40 mm / dak
- 800 dev / dak – 80 mm / dak
- 1400 dev / dak – 40 mm / dak
- 1400 dev / dak – 80 mm / dak

Aşağıda örnek olarak görülebilmesi açısından ilk 2 parametre (550 dev/dak – 40 mm/dak ve 550 dev/dak – 80 mm/dak) için mikro sertlik ölçüm değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.12. Mikro sertlik ölçüm değerleri (550 dev/dak – 40 mm/dak)

No	eksenden uzaklık (mm)	yuvarlama (mm)	HV 0.5
1	-7,017	-7,000	77,69
2	-6,008	-6,000	78,35
3	-4,997	-5,000	79,02
4	-3,970	-4,000	79,70
5	-2,986	-3,000	83,62
6	-2,002	-2,000	83,62
7	-1,006	-1,000	83,99
8	0,000	0,000	85,50
9	1,005	1,000	84,00
10	2,001	2,000	81,45
11	2,985	3,000	80,04
12	4,022	4,000	78,70
13	4,994	5,000	78,34
14	6,000	6,000	76,06
15	7,017	7,000	76,38

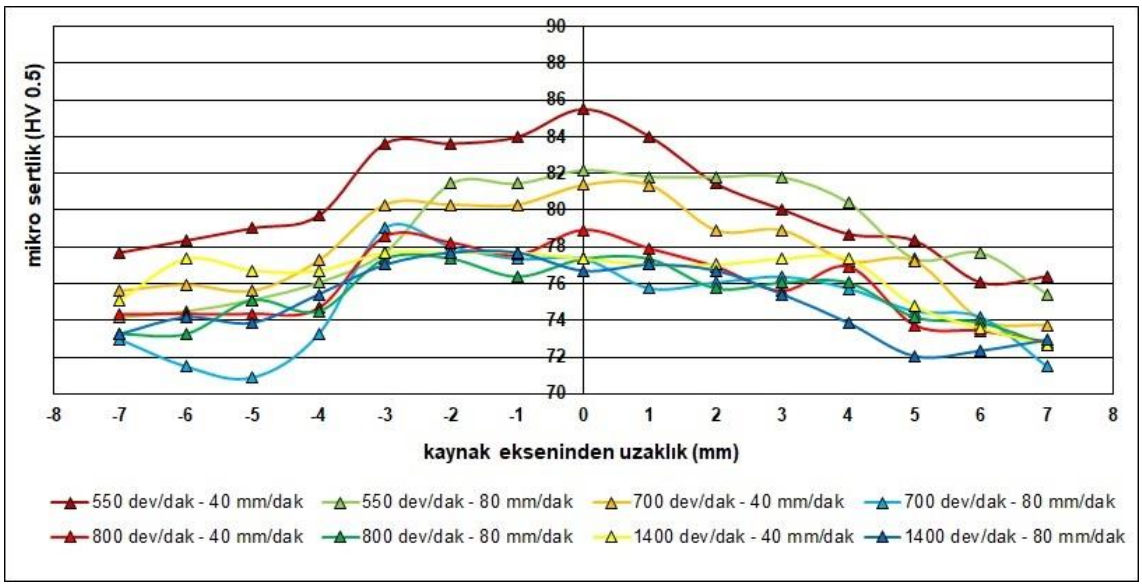
Çizelge 4.13. Mikro sertlik ölçüm değerleri (550 dev/dak – 80 mm/dak)

No	eksenden uzaklık (mm)	yuvarlama (mm)	HV 0.5
1	-7,023	-7,000	74,17
2	-6,022	-6,000	74,49
3	-5,008	-5,000	75,11
4	-3,961	-4,000	76,06
5	-3,004	-3,000	77,69
6	-1,983	-2,000	81,45
7	-1,008	-1,000	81,45
8	0,000	0,000	82,17
9	1,007	1,000	81,82
10	2,003	2,000	81,81
11	2,990	3,000	81,80
12	4,004	4,000	80,40
13	4,988	5,000	77,35
14	5,983	6,000	77,67
15	7,008	7,000	75,42

Mikro sertlik deneyleri tüm parametrelere göre gerçekleştirilmiş ve aşağıda elde edilen her bir sertlik değerinin bulunduğu ortak çizelge ve grafik verilmiştir.

Çizelge 4.14. Mikro sertlik ölçüm değerleri (tüm parametreler)

No	kaynak ekseninden uzaklık (mm)	550 dev/dak 40 mm/dak Sertlik (HV 0.5)	550 dev/dak 80 mm/dak Sertlik (HV 0.5)	700 dev/dak 40 mm/dak Sertlik (HV 0.5)	700 dev/dak 80 mm/dak Sertlik (HV 0.5)	800 dev/dak 40 mm/dak Sertlik (HV 0.5)	800 dev/dak 80 mm/dak Sertlik (HV 0.5)	1400 dev/dak 40 mm/dak Sertlik (HV 0.5)	1400 dev/dak 80 mm/dak Sertlik (HV 0.5)
1	-7,00	77,69	74,17	75,61	72,96	74,34	73,26	75,10	73,26
2	-6,00	78,35	74,49	75,95	71,48	74,35	73,26	77,35	74,17
3	-5,00	79,02	75,11	75,61	70,88	74,36	75,10	76,71	73,87
4	-4,00	79,70	76,06	77,26	73,25	74,67	74,49	76,70	75,42
5	-3,00	83,62	77,69	80,30	79,02	78,57	77,35	77,68	77,03
6	-2,00	83,62	81,45	80,30	78,01	78,24	77,35	77,68	77,69
7	-1,00	83,99	81,45	80,30	77,35	77,57	76,38	77,68	77,69
8	0,00	85,50	82,17	81,37	77,35	78,93	77,35	77,35	76,70
9	1,00	84,00	81,82	81,36	75,74	77,91	77,34	77,03	77,03
10	2,00	81,45	81,81	78,91	76,06	76,92	75,74	77,03	76,71
11	3,00	80,04	81,80	78,91	76,37	75,61	76,05	77,35	75,42
12	4,00	78,70	80,40	77,23	75,73	76,92	76,05	77,35	73,86
13	5,00	78,34	77,35	77,23	74,49	73,74	74,17	74,78	72,05
14	6,00	76,06	77,67	74,04	74,17	73,43	73,87	73,57	72,35
15	7,00	76,38	75,42	73,73	71,48	72,82	72,65	72,65	72,94



Şekil 4.8. Mikro sertlik (HV 0.5) – kaynak ekseninden uzaklık (mm) grafiği (tüm parametreler)

Şekil 4.8 incelendiğinde tüm devir sayıları ve ilerleme hızları için, Şekil 1.2'de belirtilen SKK temel kaynak bölgelerinde A ve B ile ifade edilen esas malzeme ve ısıdan etkilenmemiş bölgelerde, C ve D ile ifade edilen termo mekanik etkilenmiş bölge ve dinamik yeniden kristalleşmiş bölgelere göre nispeten daha düşük sertlik değerleri elde edilmiştir. Kaynak ekseninden uzaklaşıp esas malzemeye ulaşıldığında düşük sertlik değerleri açıkça görülmektedir.

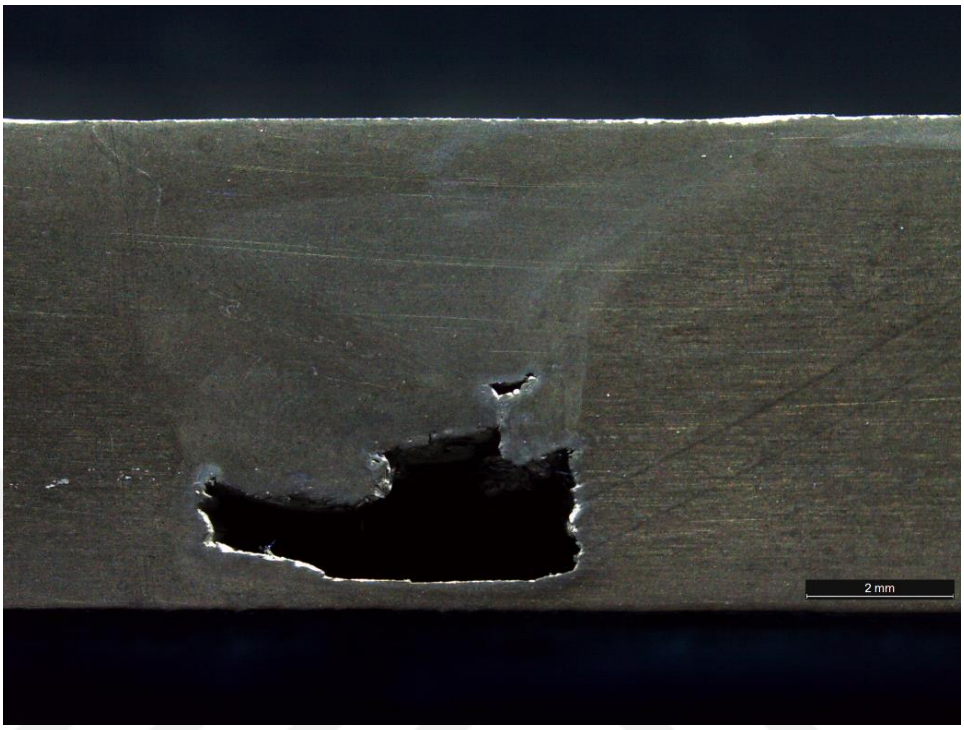
Düşük devir sayısı (550 dev/dak) ile birleştirilmiş olan numunelerde kaynak eksenine yani C ve D bölgelerine yaklaştıkça, orta (700 dev/dak ile 800 dev/dak) ve yüksek (1400 dev/dak) ile birleştirilmiş olan numunelere göre daha yüksek sertlik değerleri tespit edilmiştir.

İlerleme hızları arttıkça düşük miktarlarda da olsa hem C ve D bölgelerinde hem de A ve B bölgelerinde sertlik değerlerinde azalmalar görülmüştür. Bunun sebebi olarak, düşük ilerleme hızlarında yüksek ilerleme hızlarına göre numunelerin SKK ile birleştirilmesinde sürtünme ve karıştırma süresinin daha fazla olması sebebiyle daha fazla ısınması ve bulunduğu ortamda hızlı soğuması gösterilebilir.

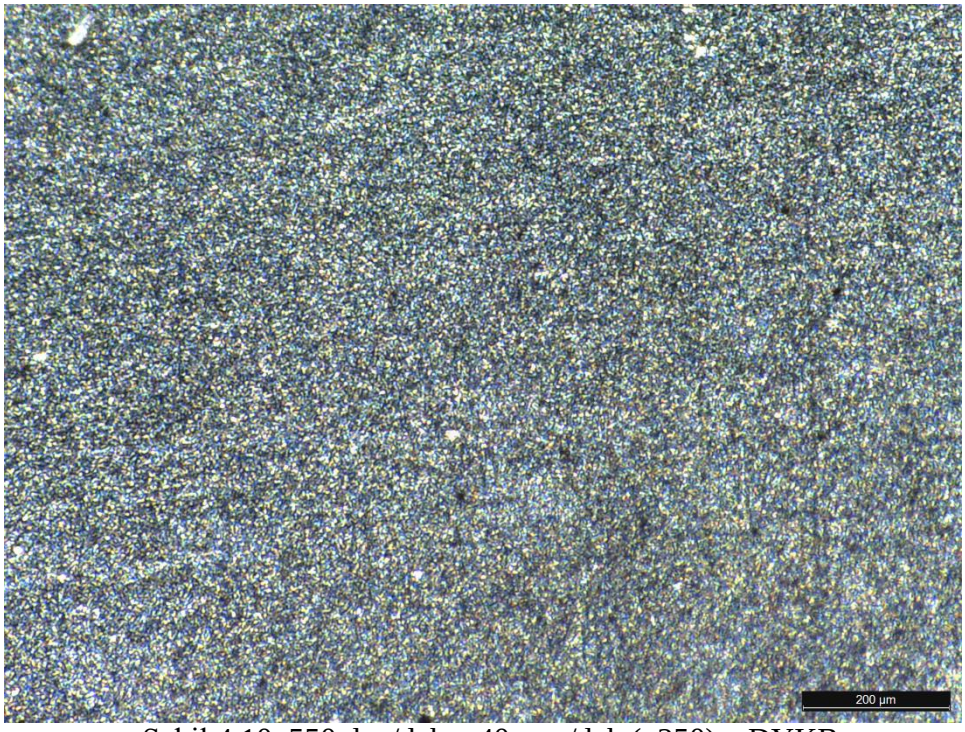
Ayrıca şekilden de anlaşılacağı üzere maksimum sertlik değerlerinde, devir sayılarının ilerleme hızlarına göre daha fazla etkisi olduğu görülmektedir.

4.2. Mikroyapı Deneylerinin Sonuçları

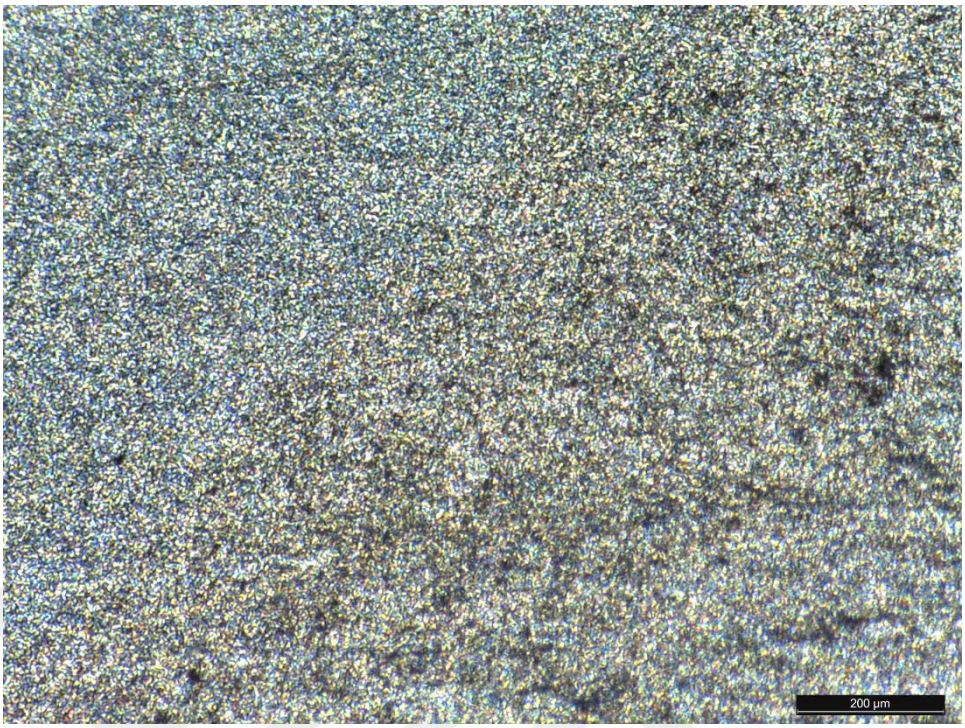
Mikroyapı deneyleri için, numunelerin görüntülemesi, belirtilen şartlar içerisinde ve önceki çalışmalar da dikkate alınarak gerçekleştirilmiş, sonuçlar aşağıda verilmiştir.



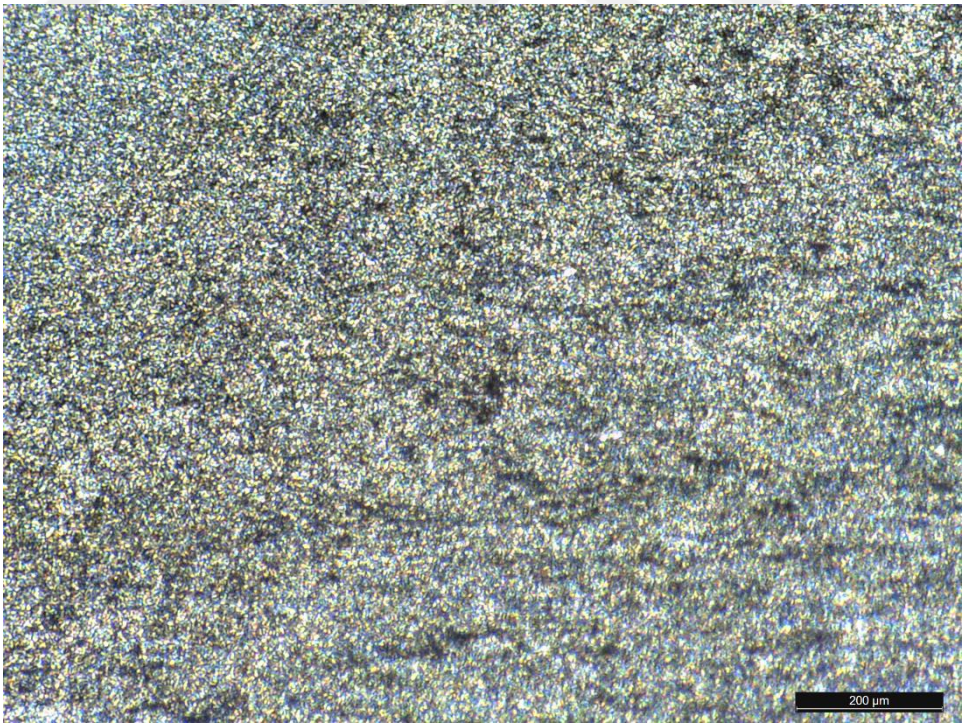
Şekil 4.9. 550 dev/dak – 40 mm/dak (x10) makro görüntü



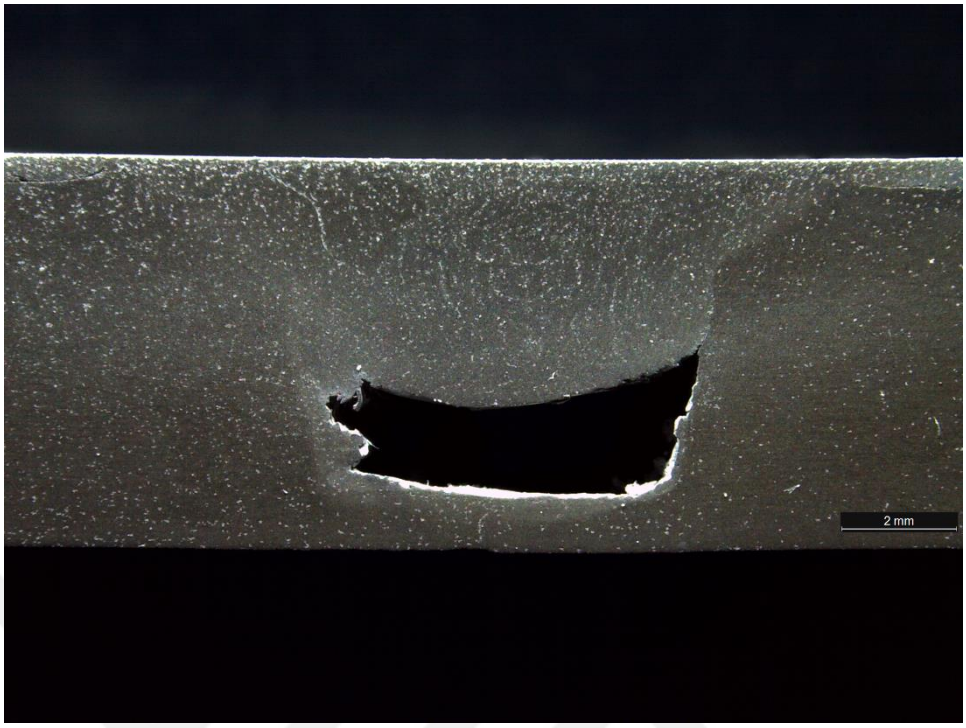
Şekil 4.10. 550 dev/dak – 40 mm/dak (x250) – DYKB



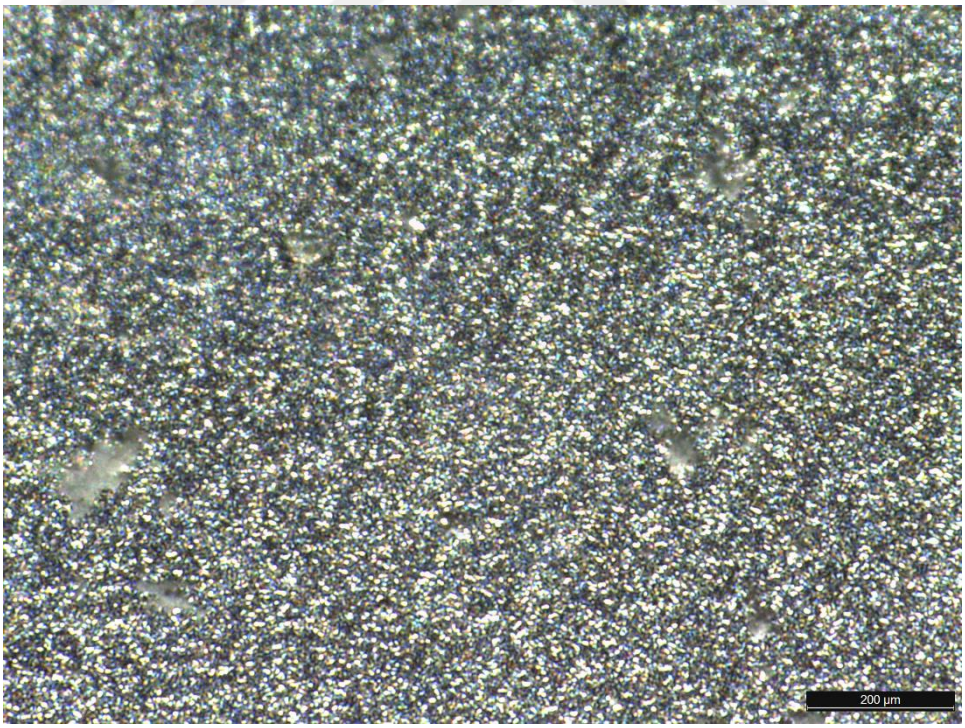
Şekil 4.11. 550 dev/dak – 40 mm/dak (x250) – TMEB



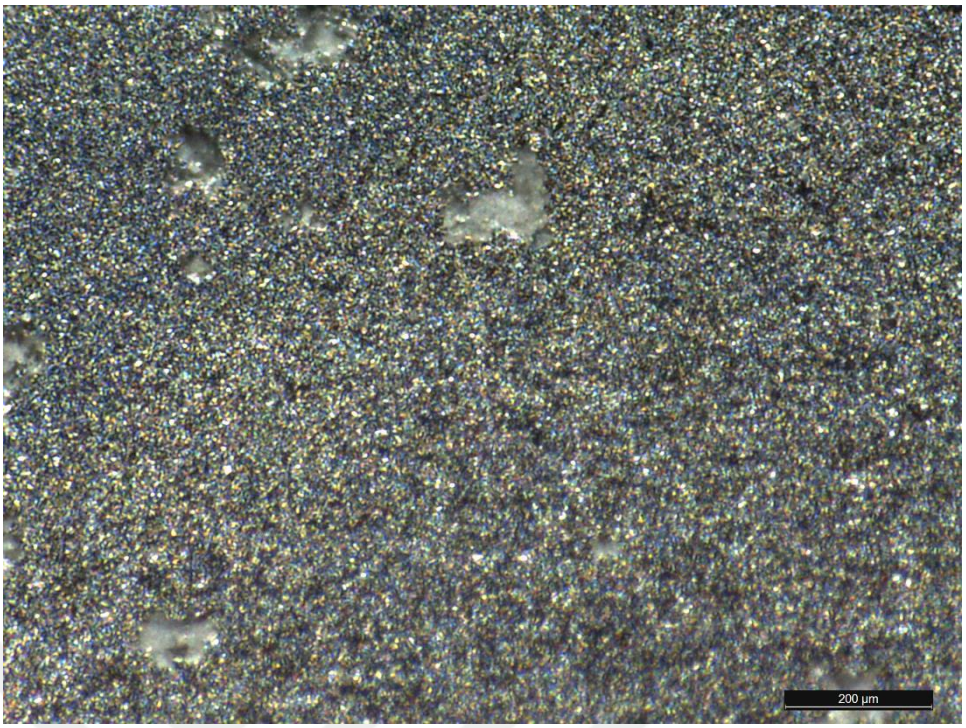
Şekil 4.12. 550 dev/dak – 40 mm/dak (x250) – IEB



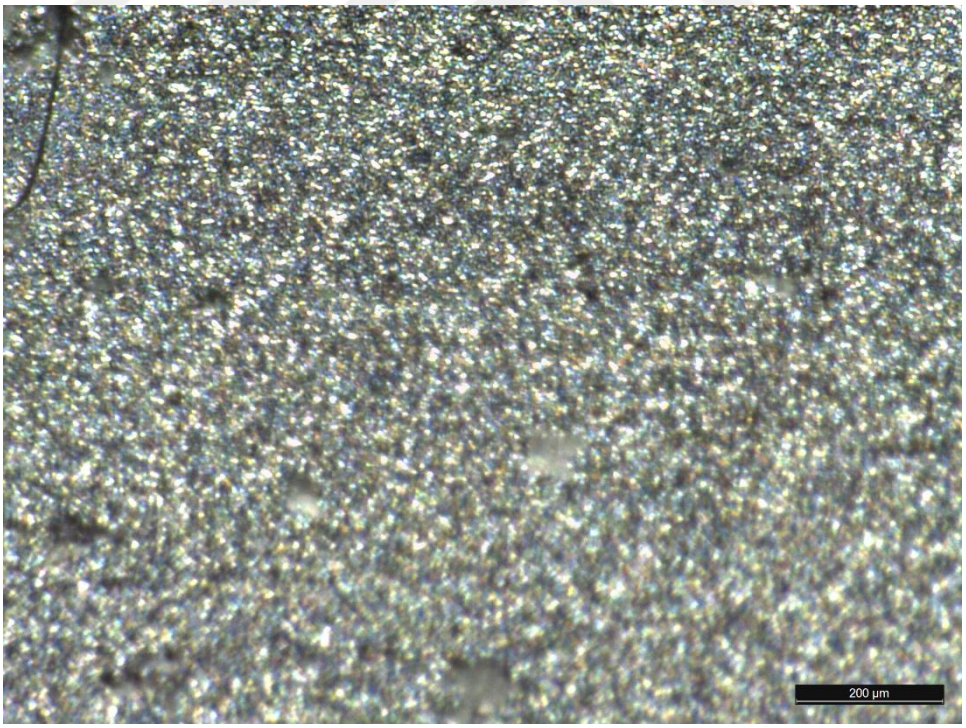
Şekil 4.13. 700 dev/dak – 40 mm/dak (x10) makro görüntü



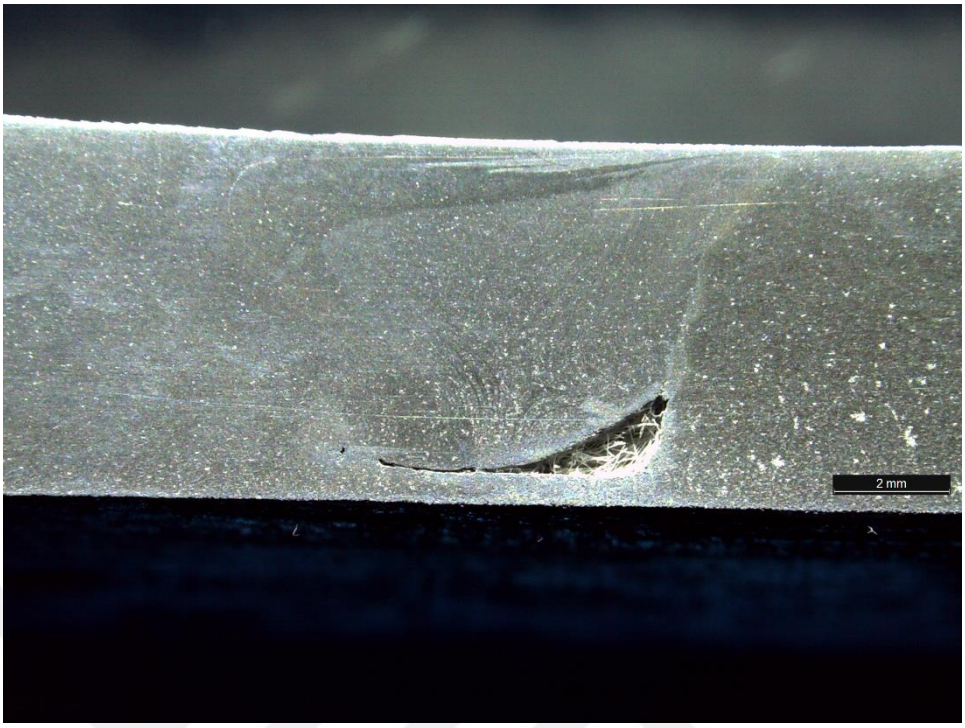
Şekil 4.14. 700 dev/dak – 40 mm/dak (x250) – DYKB



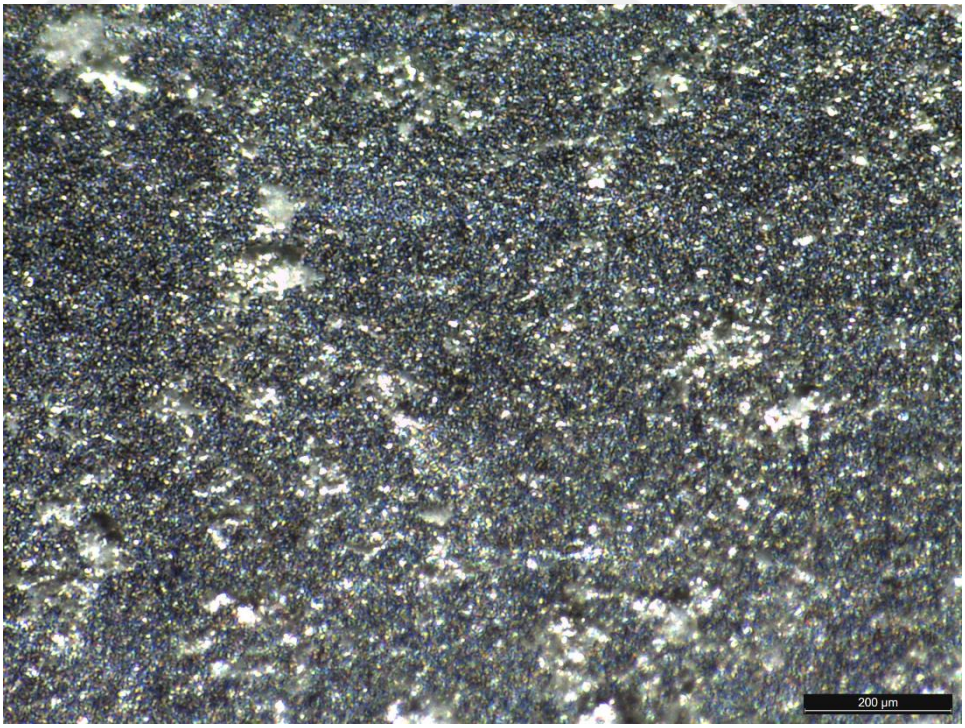
Şekil 4.15. 700 dev/dak – 40 mm/dak (x250) – TMEB



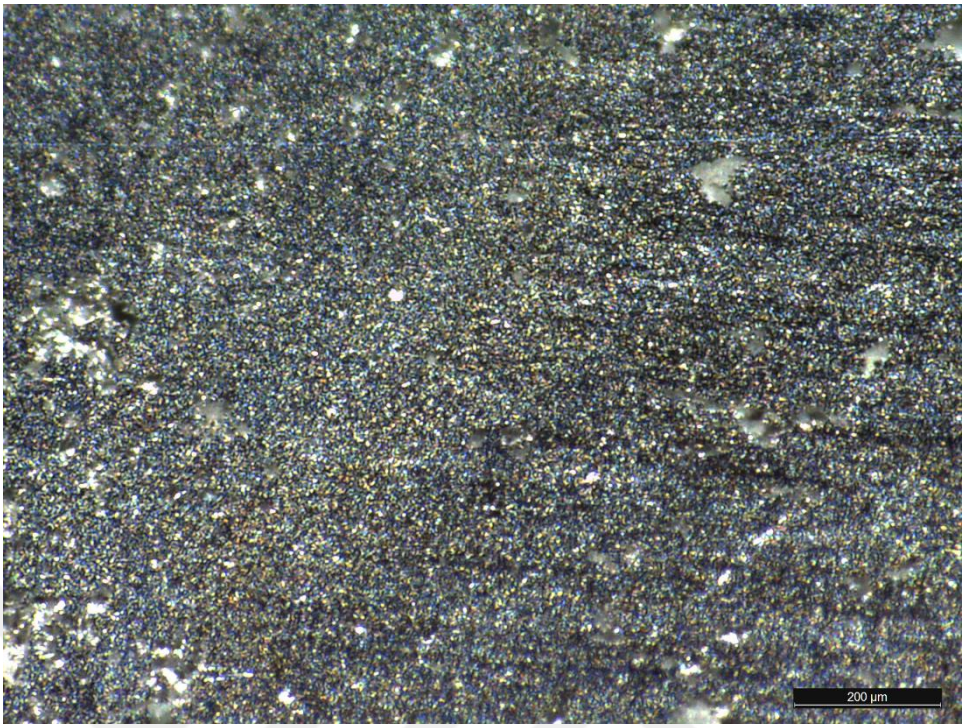
Şekil 4.16. 700 dev/dak – 40 mm/dak (x250) – IEB



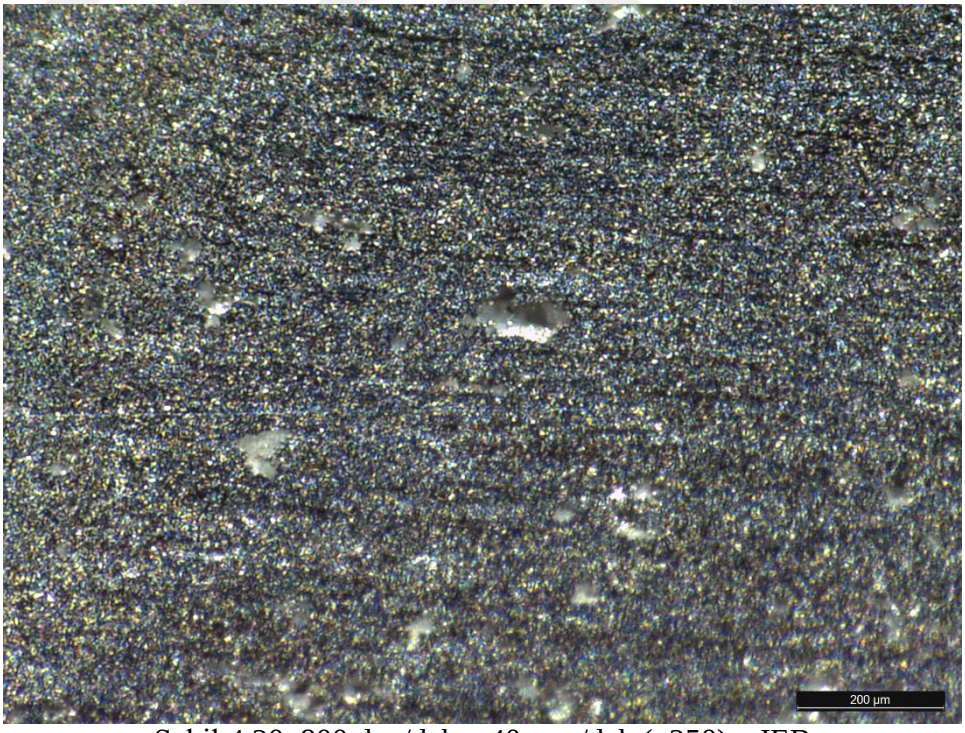
Şekil 4.17. 800 dev/dak – 40 mm/dak (x10) makro görüntü



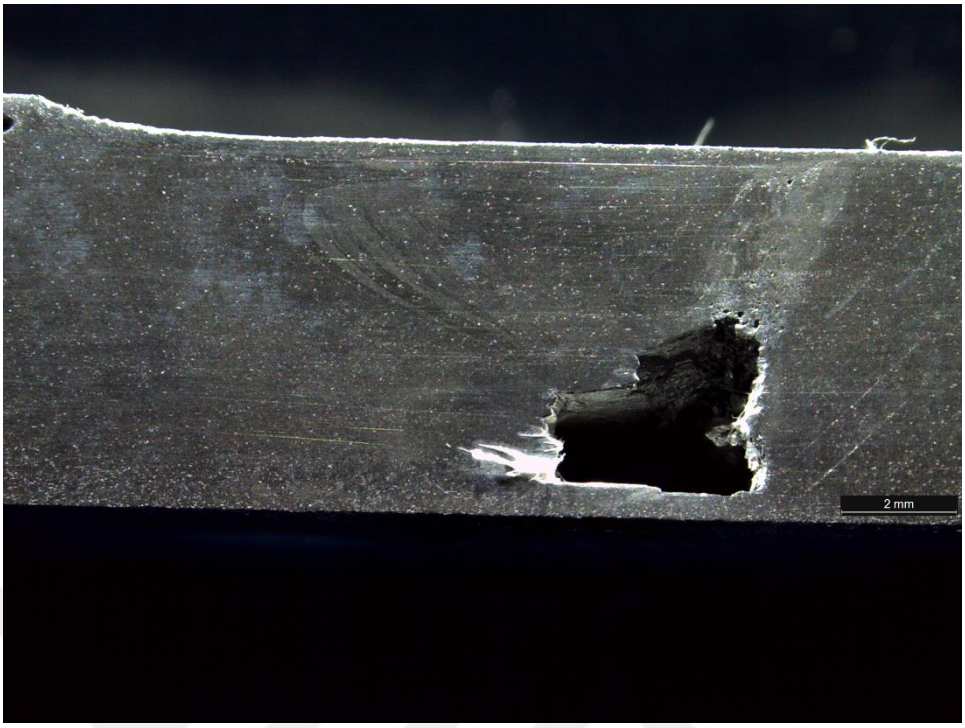
Şekil 4.18. 800 dev/dak – 40 mm/dak (x250) – DYKB



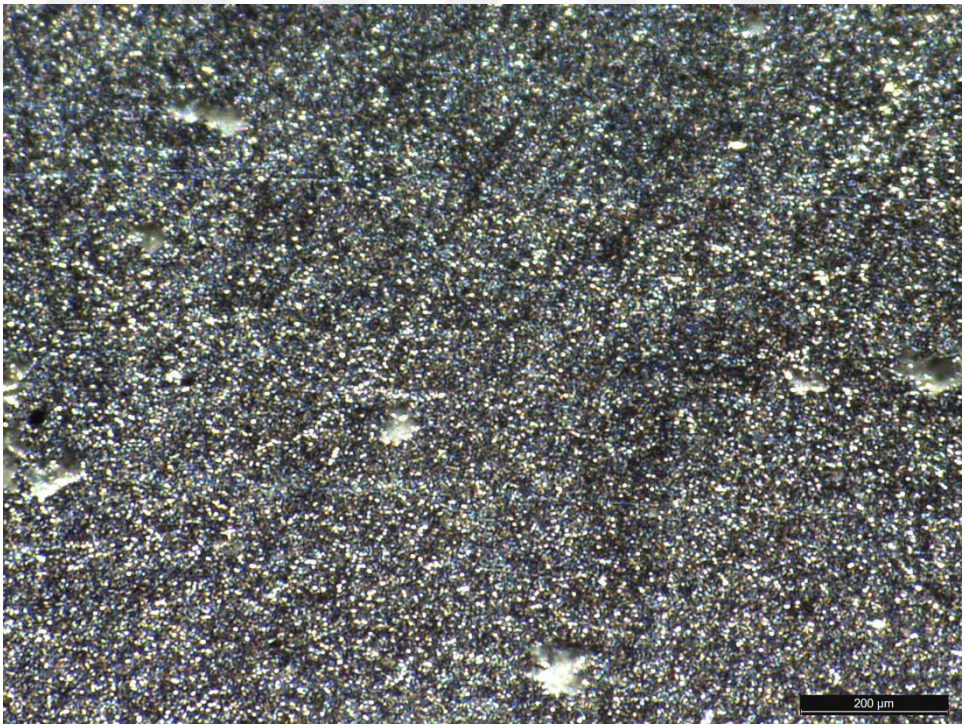
Şekil 4.19. 800 dev/dak – 40 mm/dak (x250) – TMEB



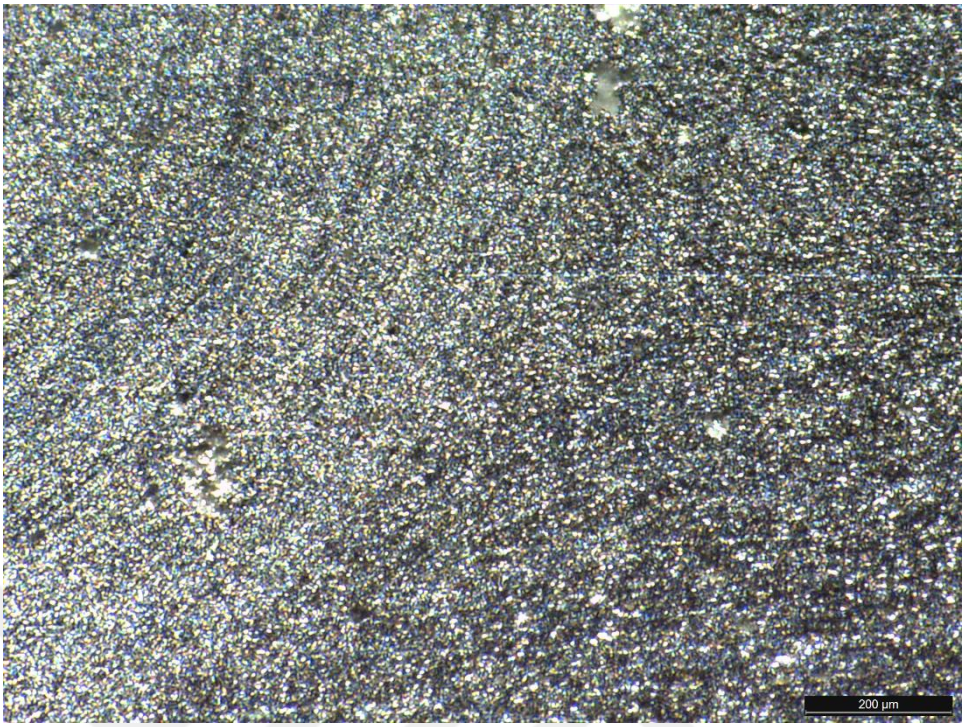
Şekil 4.20. 800 dev/dak – 40 mm/dak (x250) – IEB



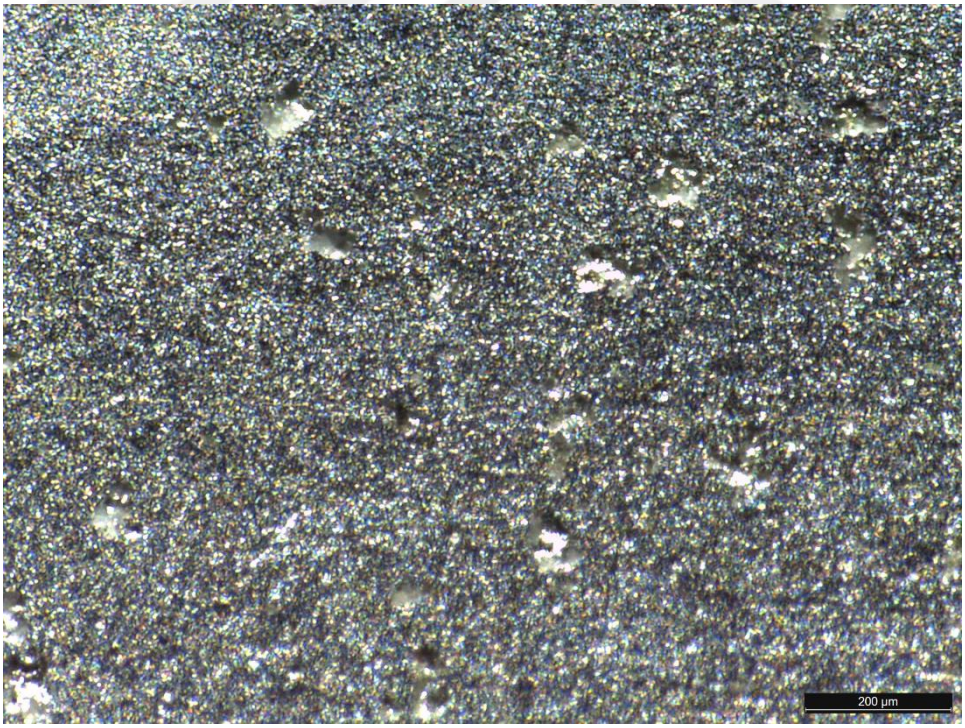
Şekil 4.21. 1400 dev/dak – 40 mm/dak (x10) makro görüntü



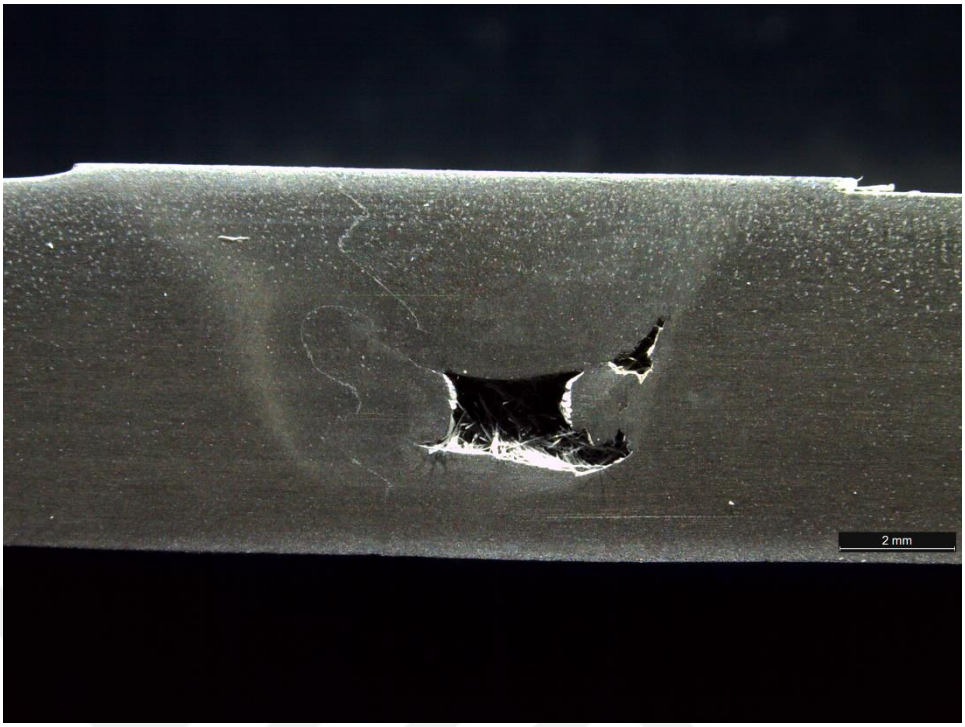
Şekil 4.22. 1400 dev/dak – 40 mm/dak (x250) – DYKB



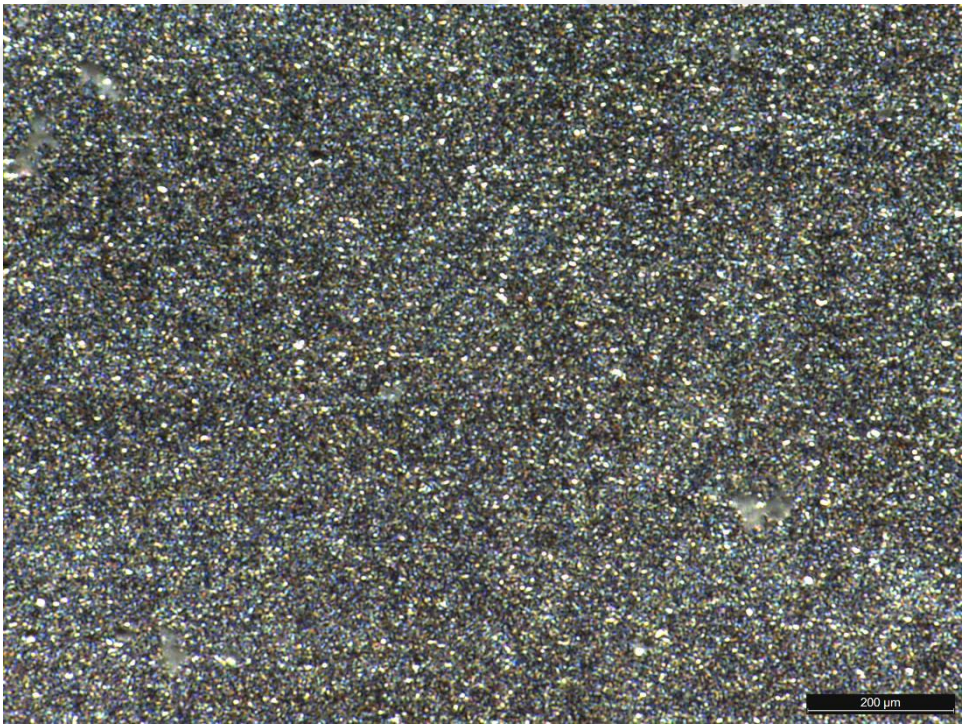
Şekil 4.23. 1400 dev/dak – 40 mm/dak (x250) – TMEB



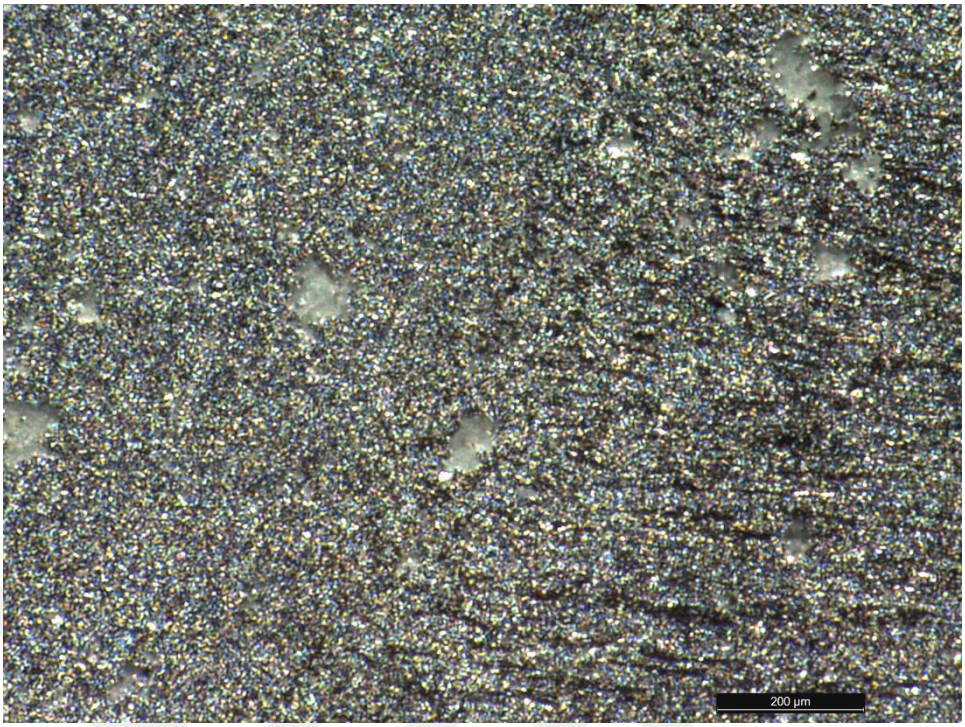
Şekil 4.24. 1400 dev/dak – 40 mm/dak (x250) – IEB



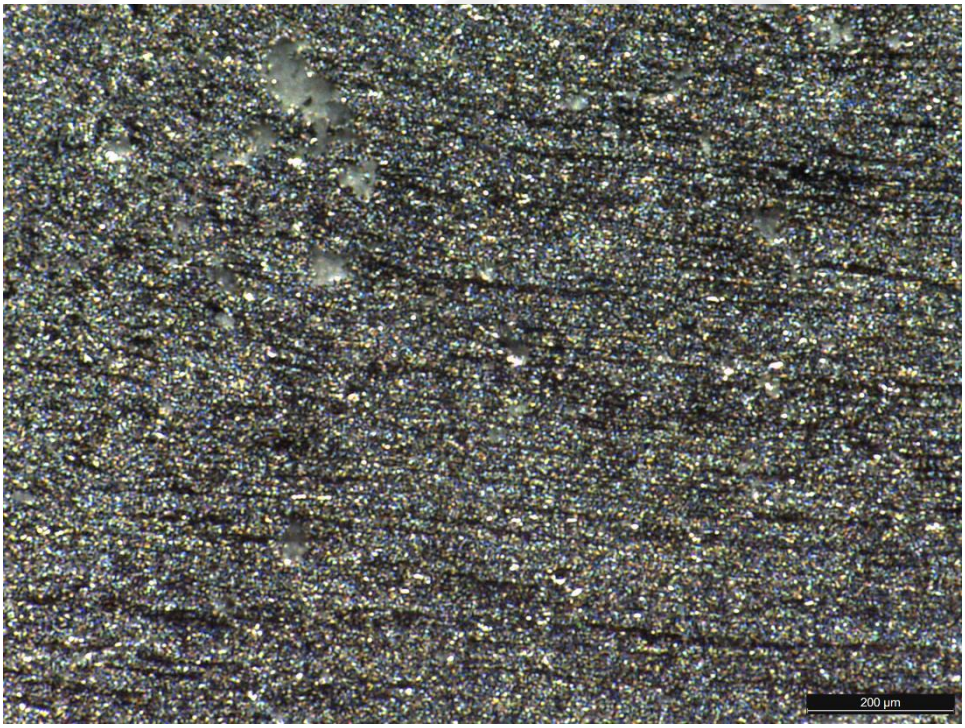
Şekil 4.25. 550 dev/dak – 80 mm/dak (x10) makro görüntü



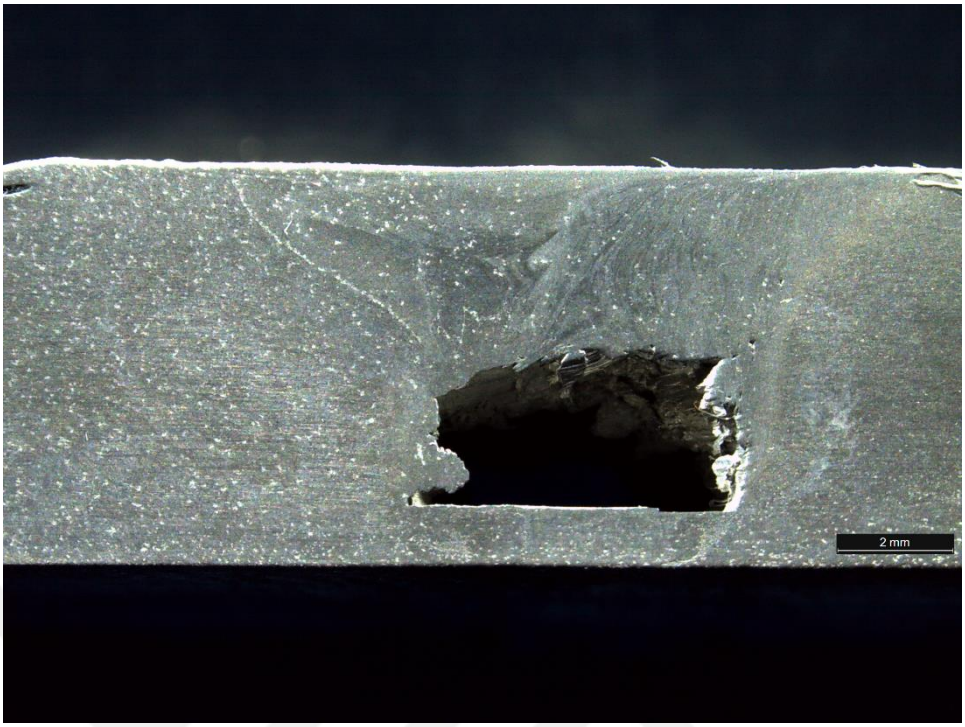
Şekil 4.26. 550 dev/dak – 80 mm/dak (x250) – DYKB



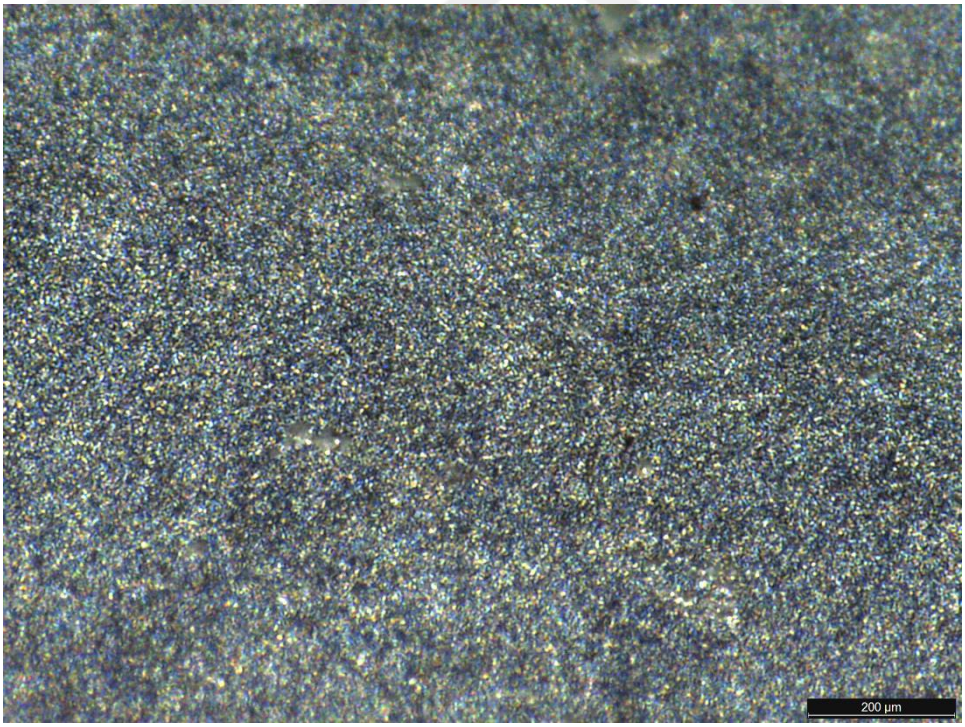
Şekil 4.27. 550 dev/dak – 80 mm/dak (x250) – TMEB



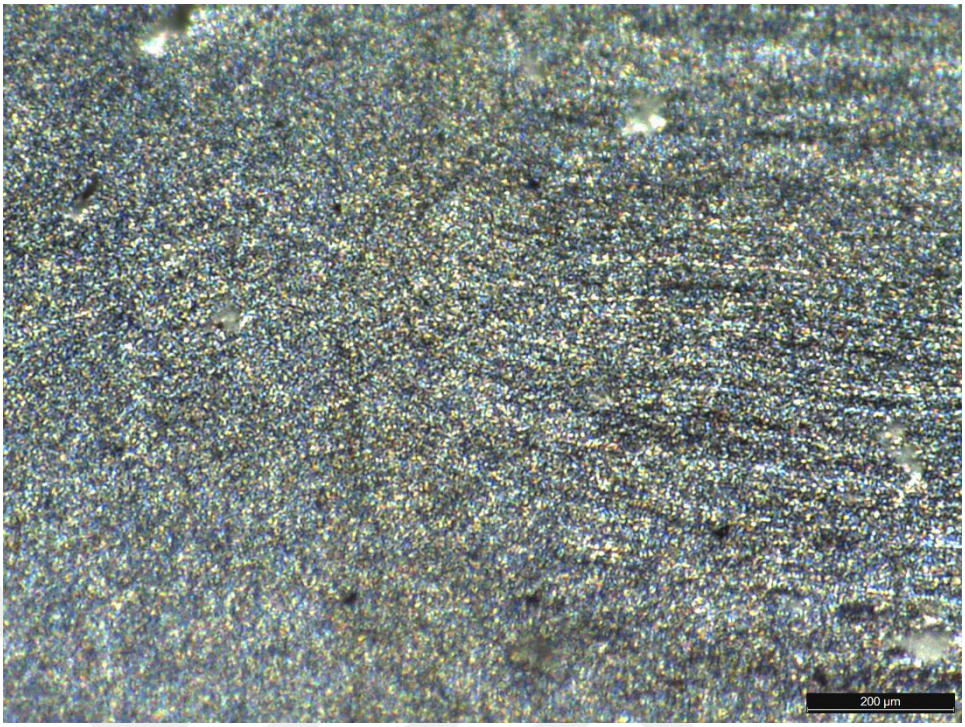
Şekil 4.28. 550 dev/dak – 80 mm/dak (x250) – IEB



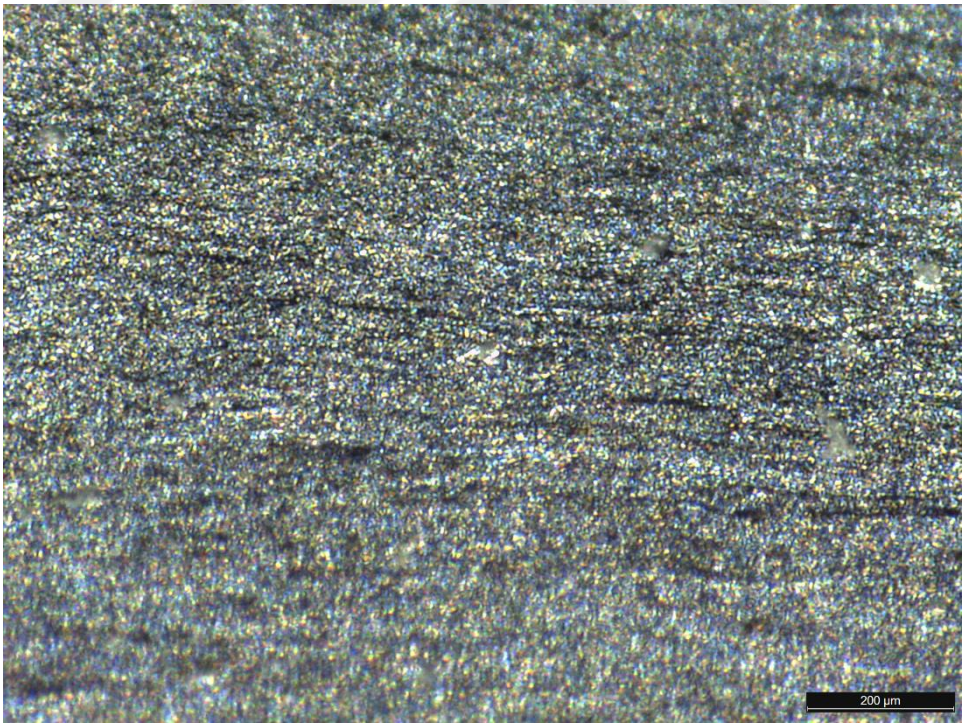
Şekil 4.29. 700 dev/dak – 80 mm/dak (x10) makro görüntü



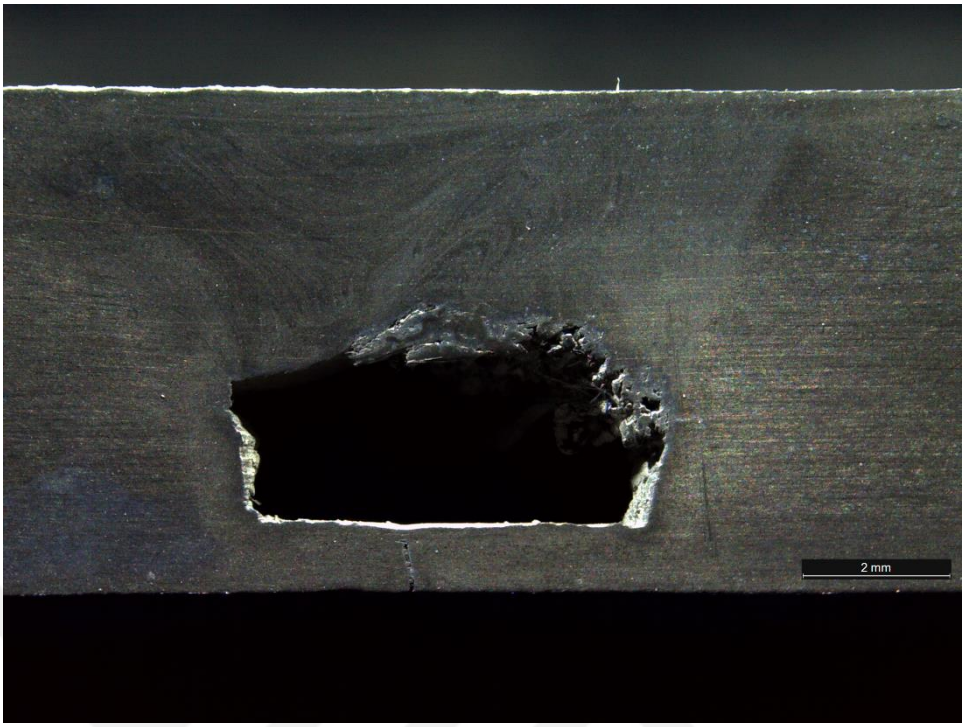
Şekil 4.30. 700 dev/dak – 80 mm/dak (x250) – DYKB



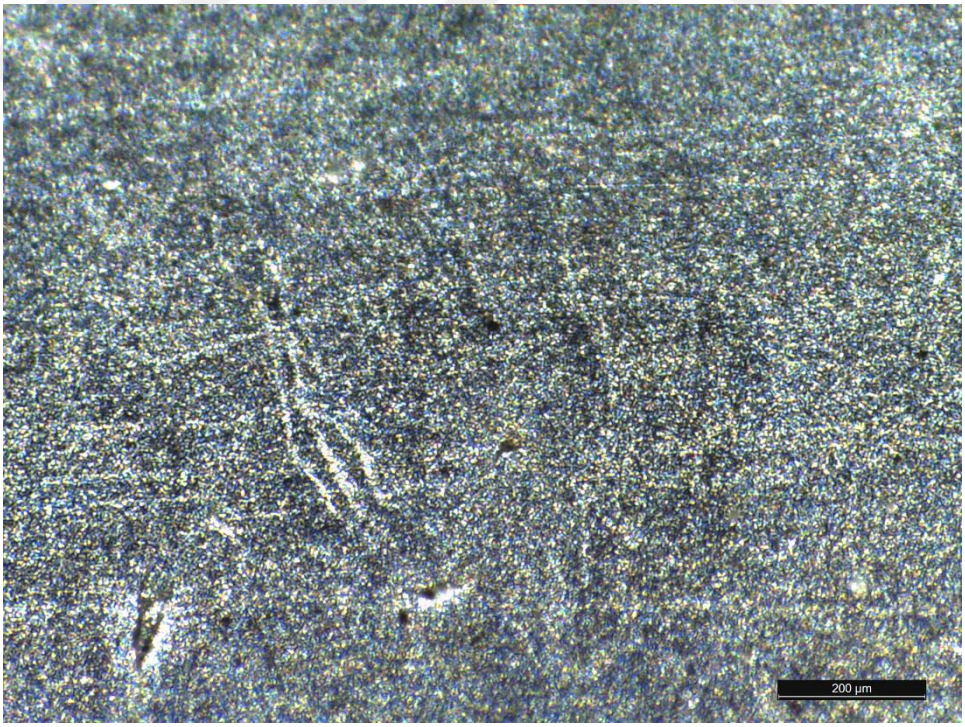
Şekil 4.31. 700 dev/dak – 80 mm/dak (x250) – TMEB



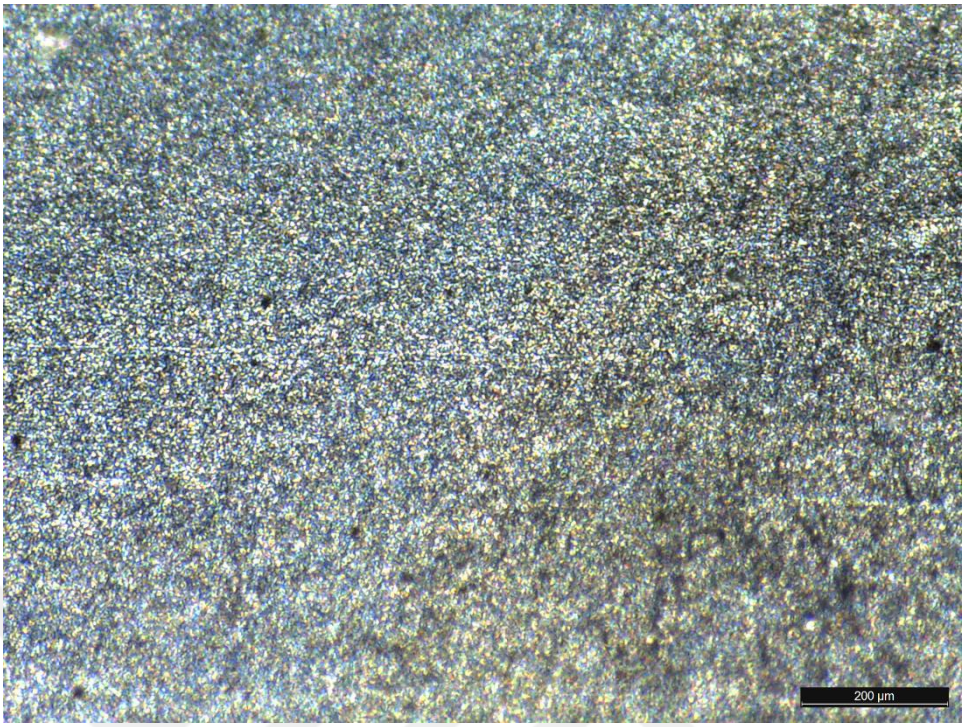
Şekil 4.32. 700 dev/dak – 80 mm/dak (x250) – IEB



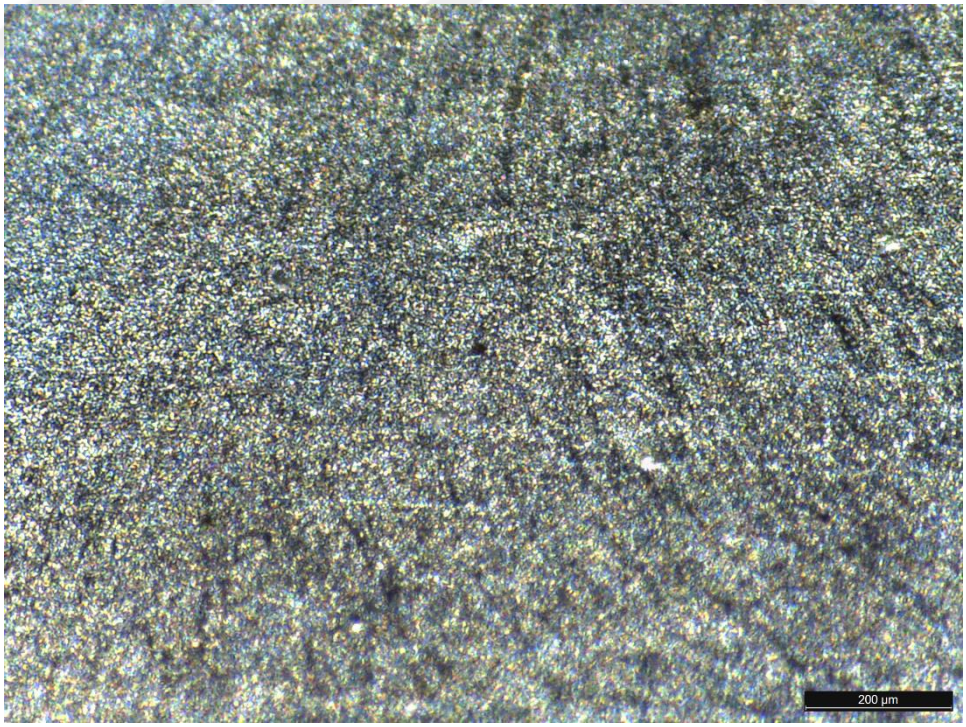
Şekil 4.33. 800 dev/dak – 80 mm/dak (x10) makro görüntü



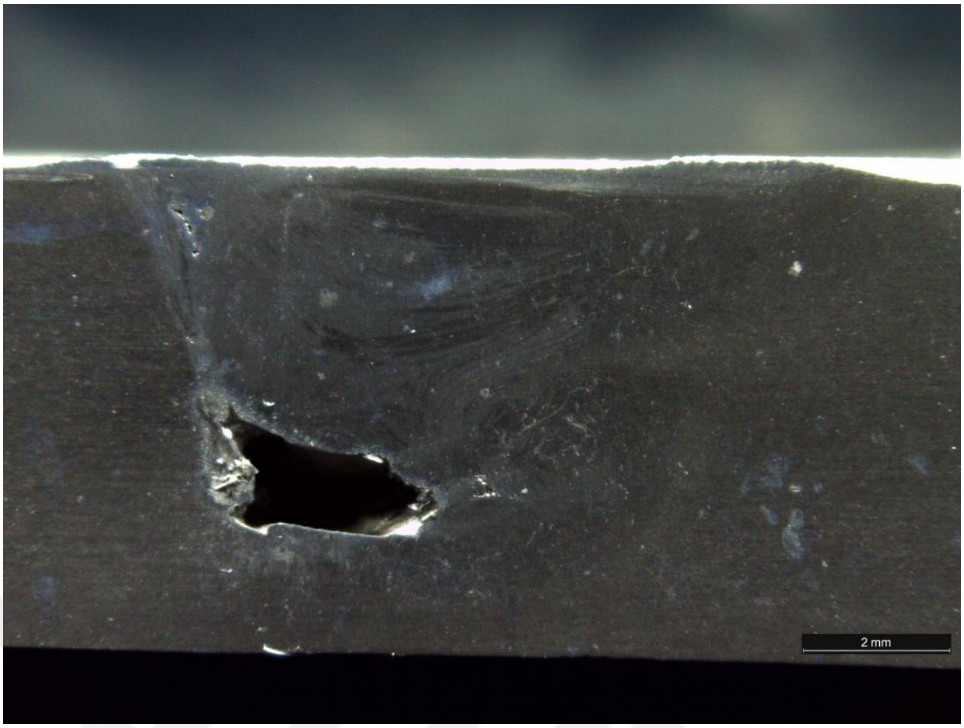
Şekil 4.34. 800 dev/dak – 80 mm/dak (x250) – DYKB



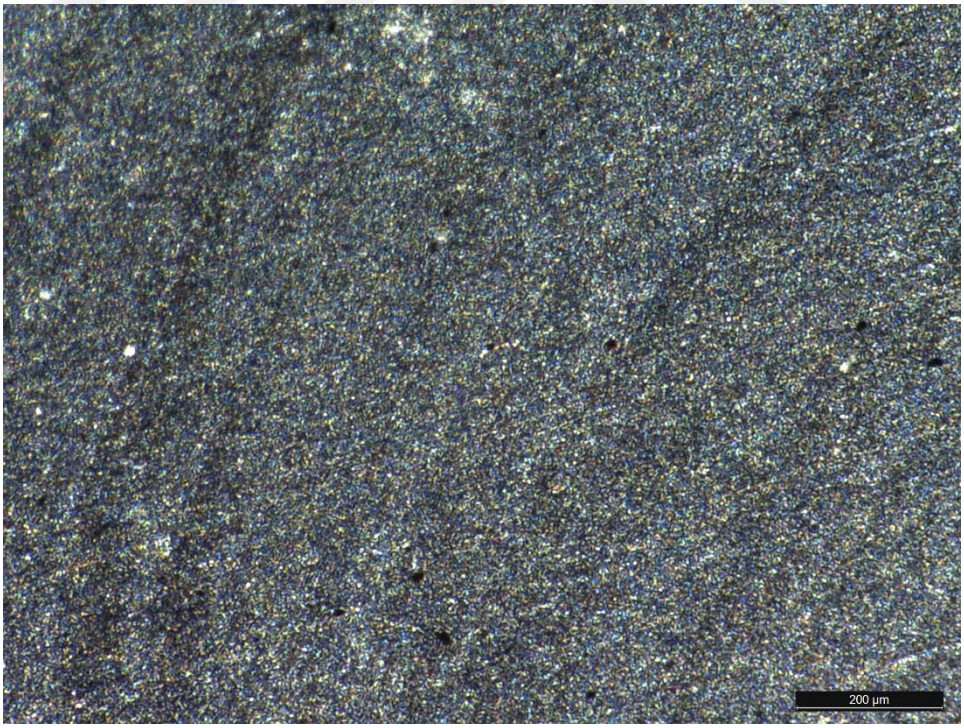
Şekil 4.35. 800 dev/dak – 80 mm/dak (x250) – TMEB



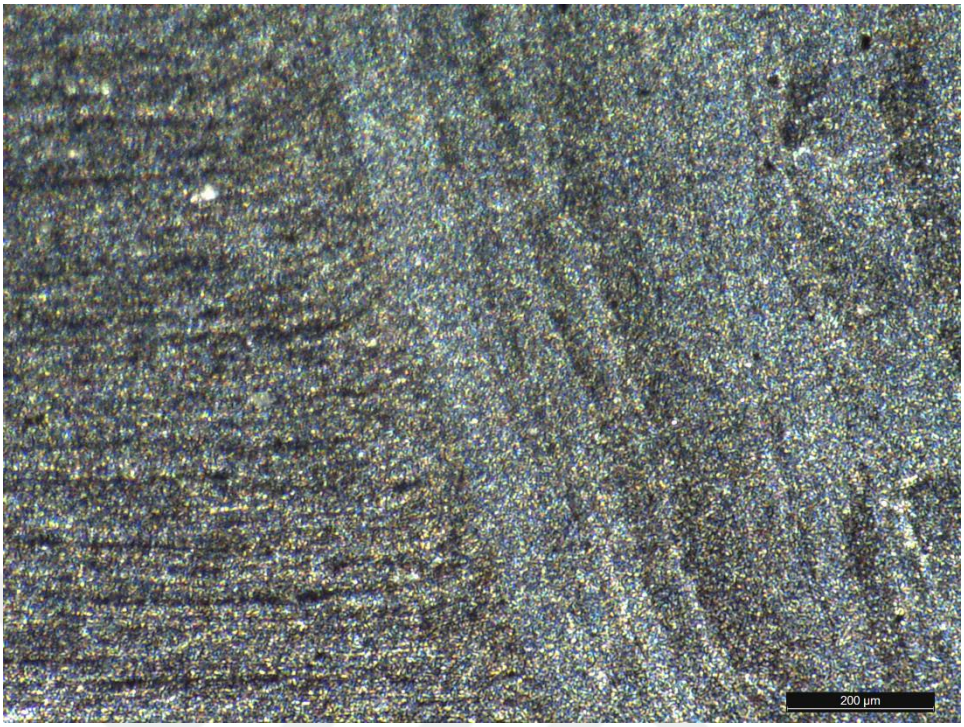
Şekil 4.36. 800 dev/dak – 80 mm/dak (x250) – IEB



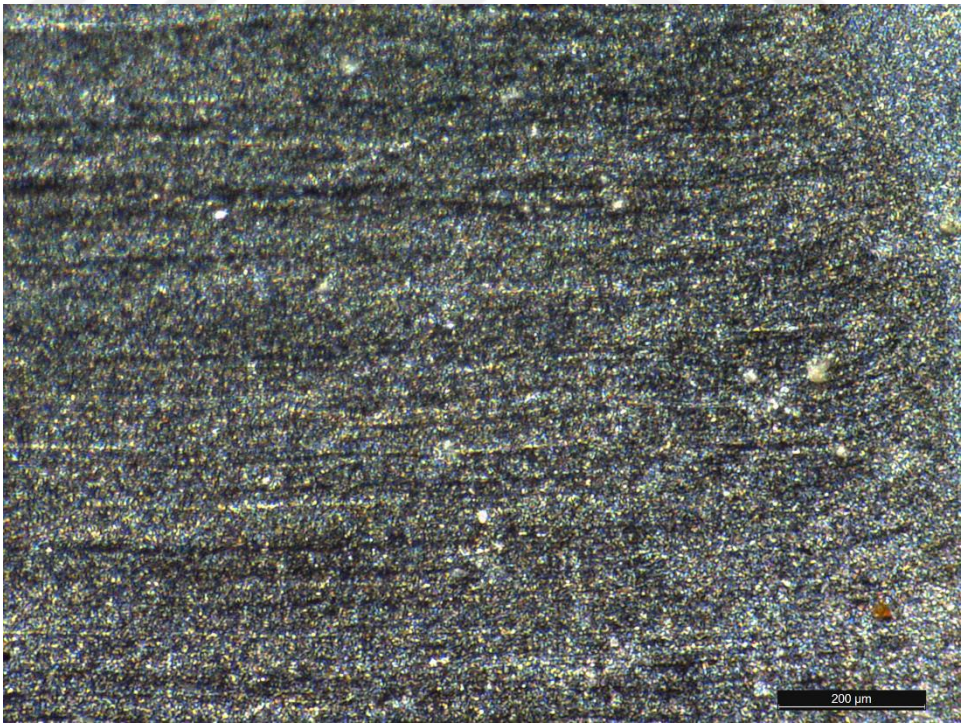
Şekil 4.37. 1400 dev/dak – 80 mm/dak (x10) makro görüntü



Şekil 4.38. 1400 dev/dak – 80 mm/dak (x250) – DYKB

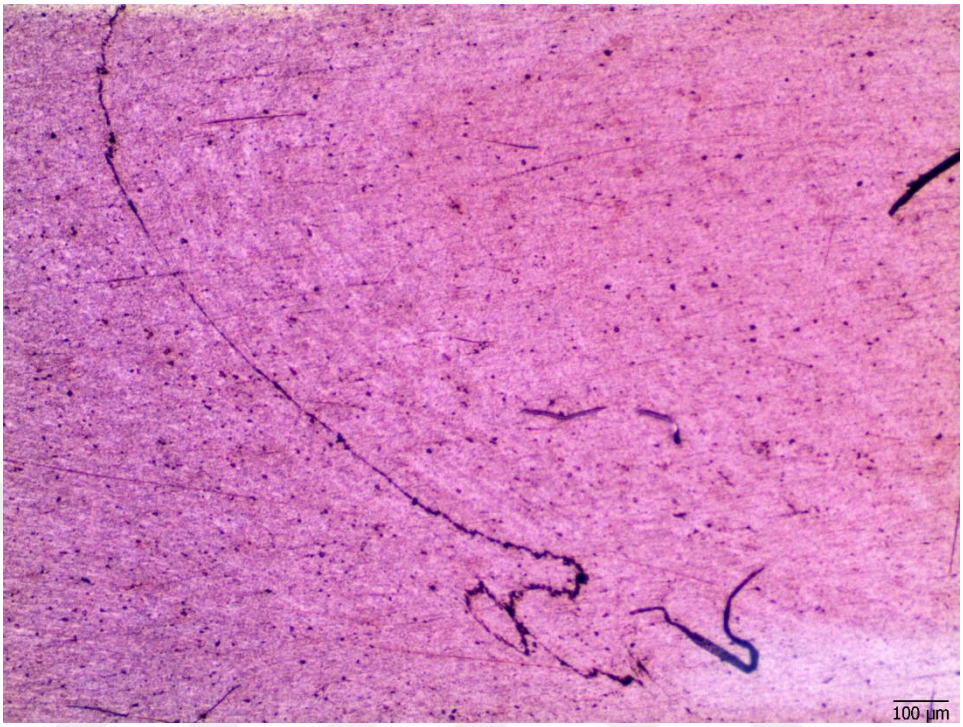


Şekil 4.39. 1400 dev/dak – 80 mm/dak (x250) – TMEB

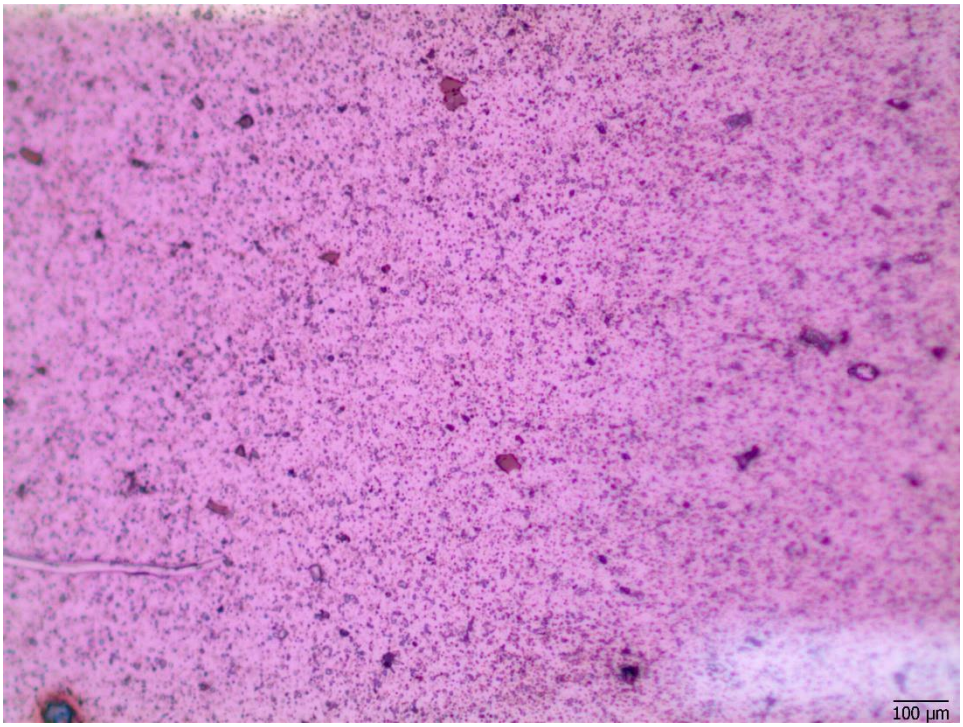


Şekil 4.40. 1400 dev/dak – 80 mm/dak (x250) – IEB

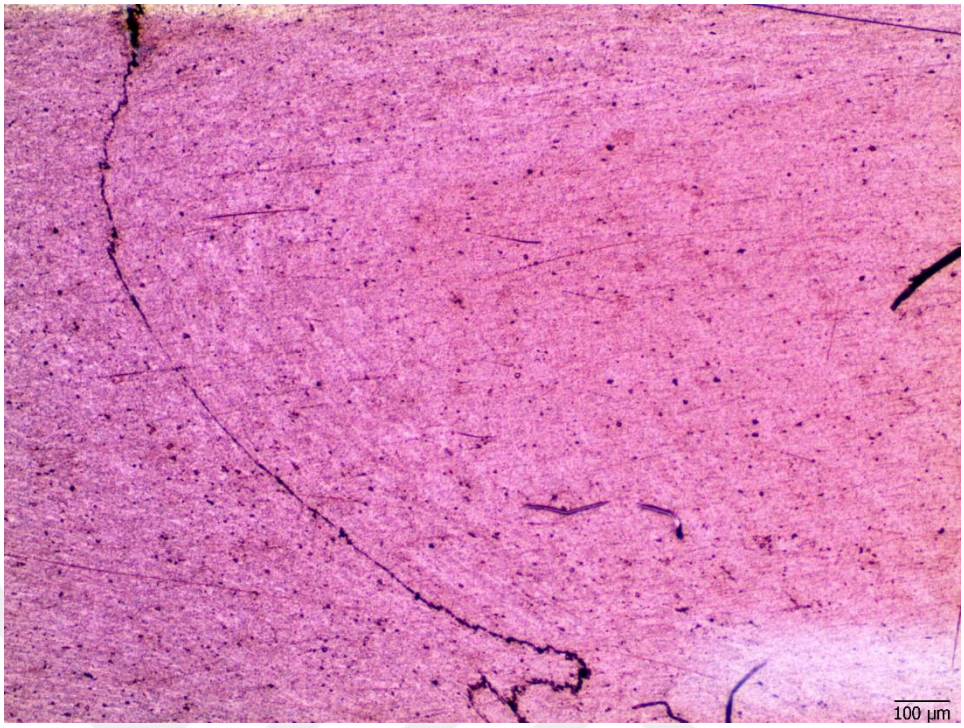
Yukarıda verilen görüntülerin haricinde, farklı ışık renkleri ve büyütme oranları ile elde edilen mikroyapı görüntüleri aşağıda verilmiştir.



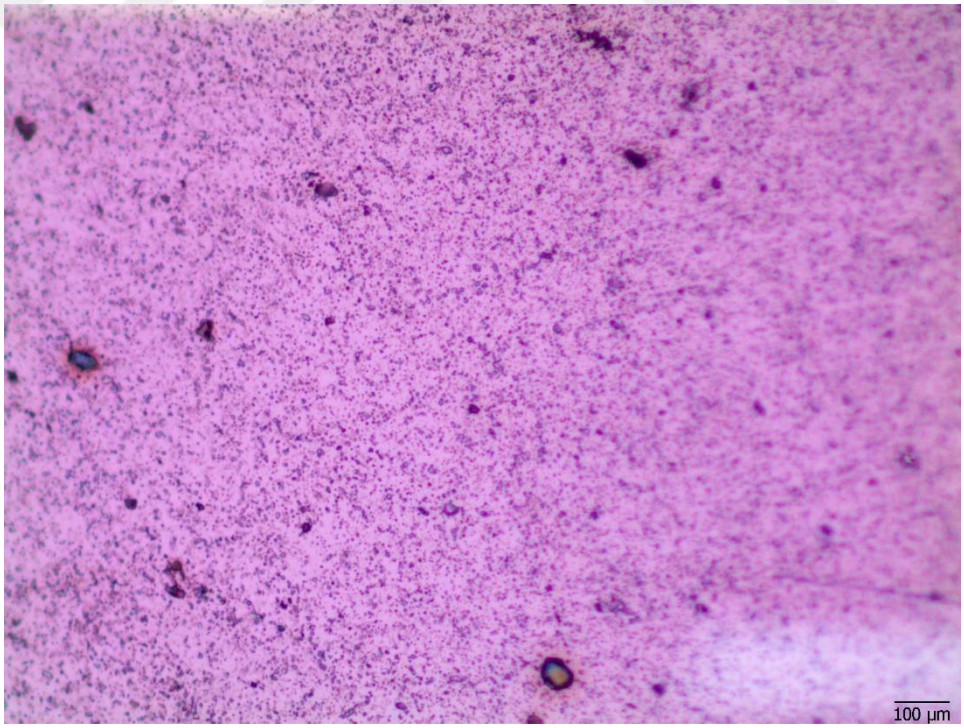
Şekil 4.41. 550 dev/dak – 40 mm/dak (x50) – DYKB



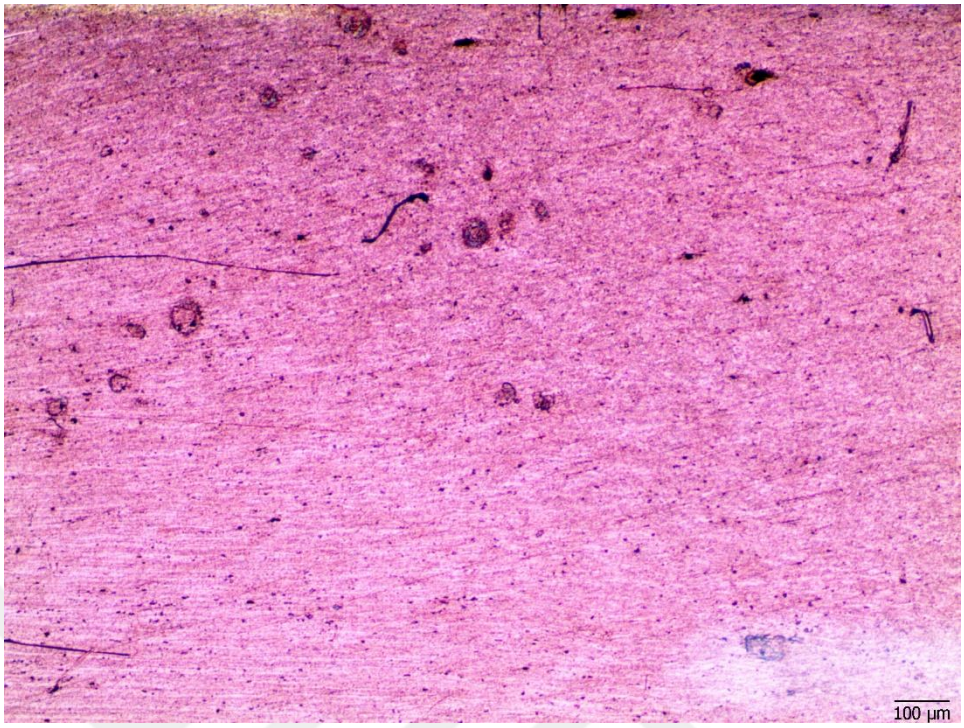
Şekil 4.42. 550 dev/dak – 40 mm/dak (x500) – DYKB



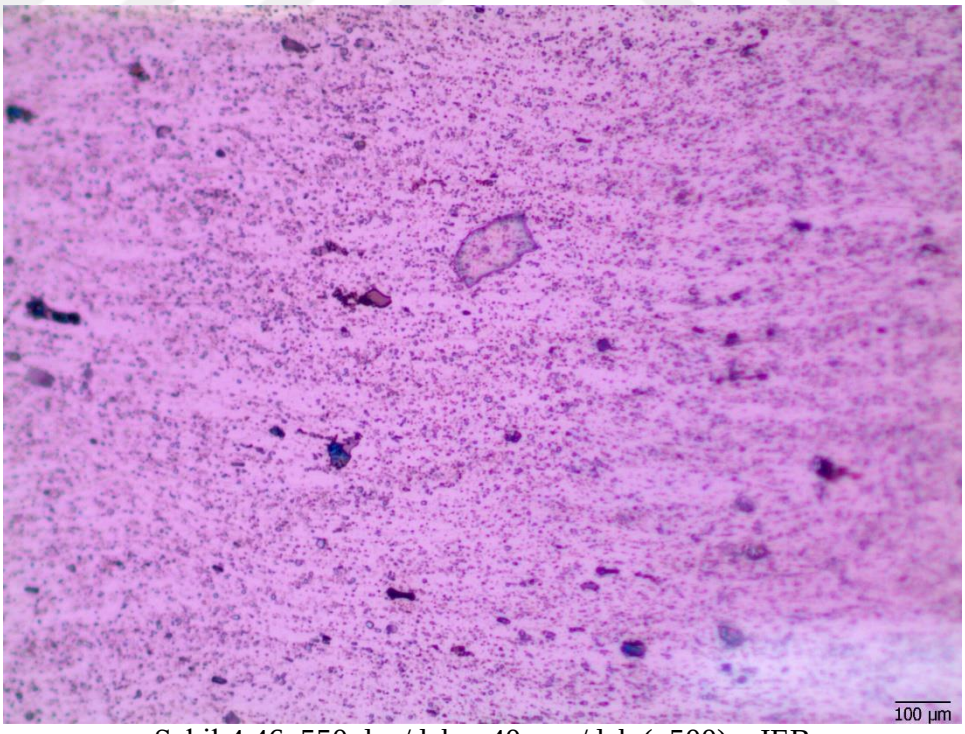
Şekil 4.43. 550 dev/dak – 40 mm/dak (x50) – TMEB



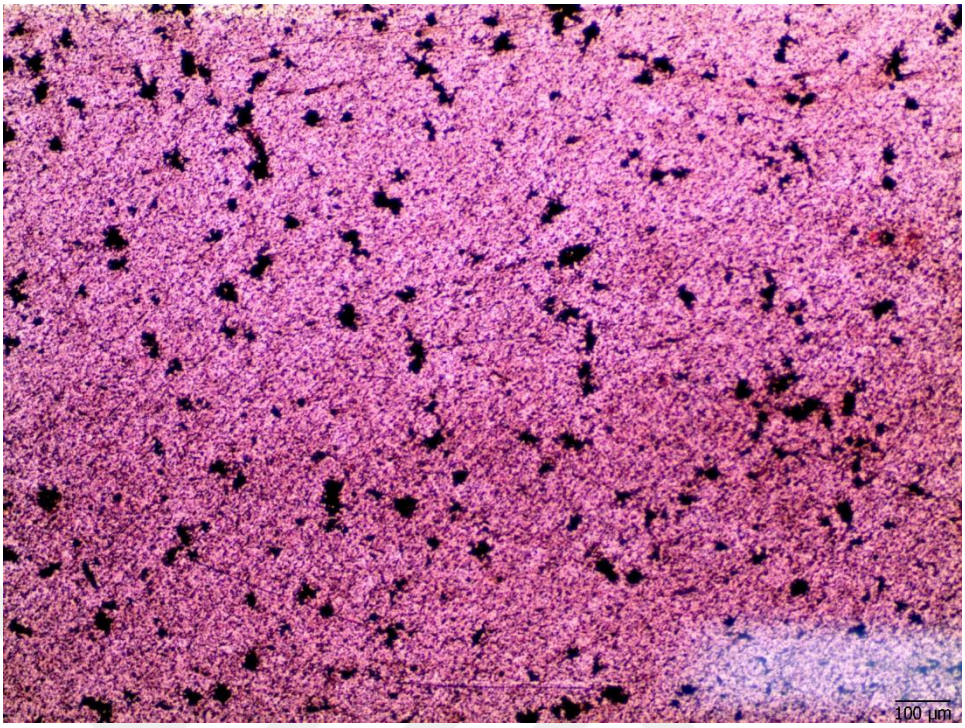
Şekil 4.44. 550 dev/dak – 40 mm/dak (x500) – TMEB



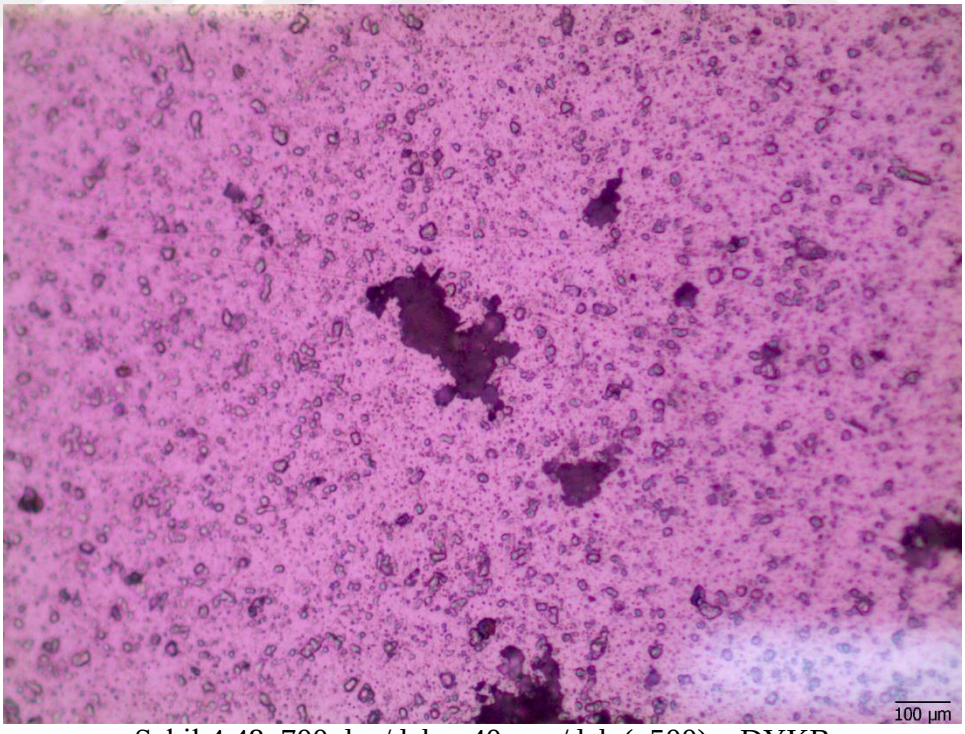
Şekil 4.45. 550 dev/dak – 40 mm/dak (x50) – IEB



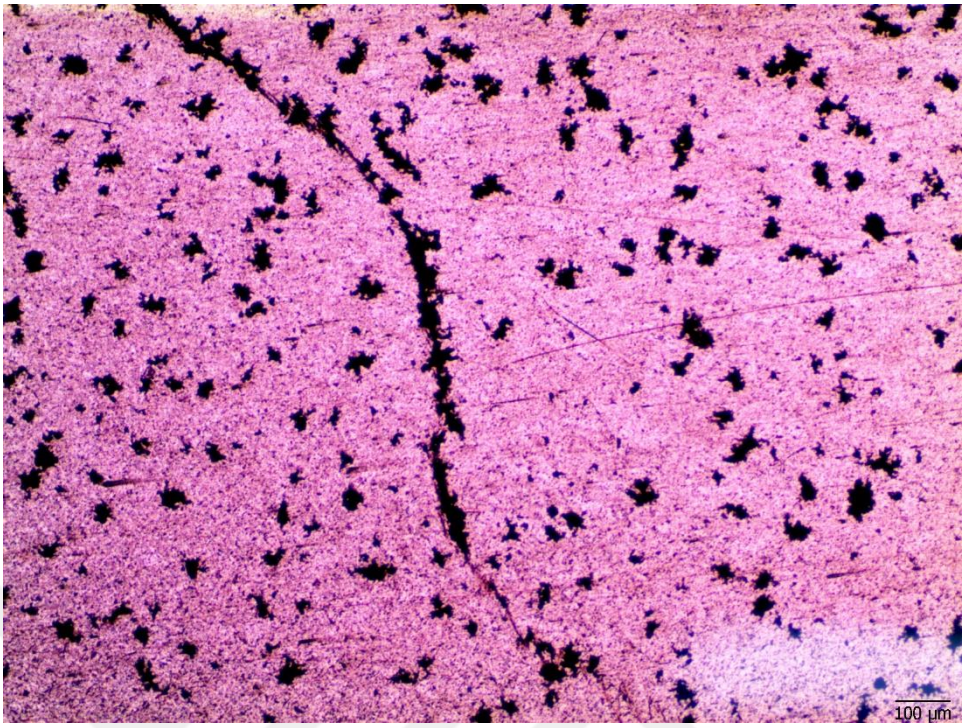
Şekil 4.46. 550 dev/dak – 40 mm/dak (x500) – IEB



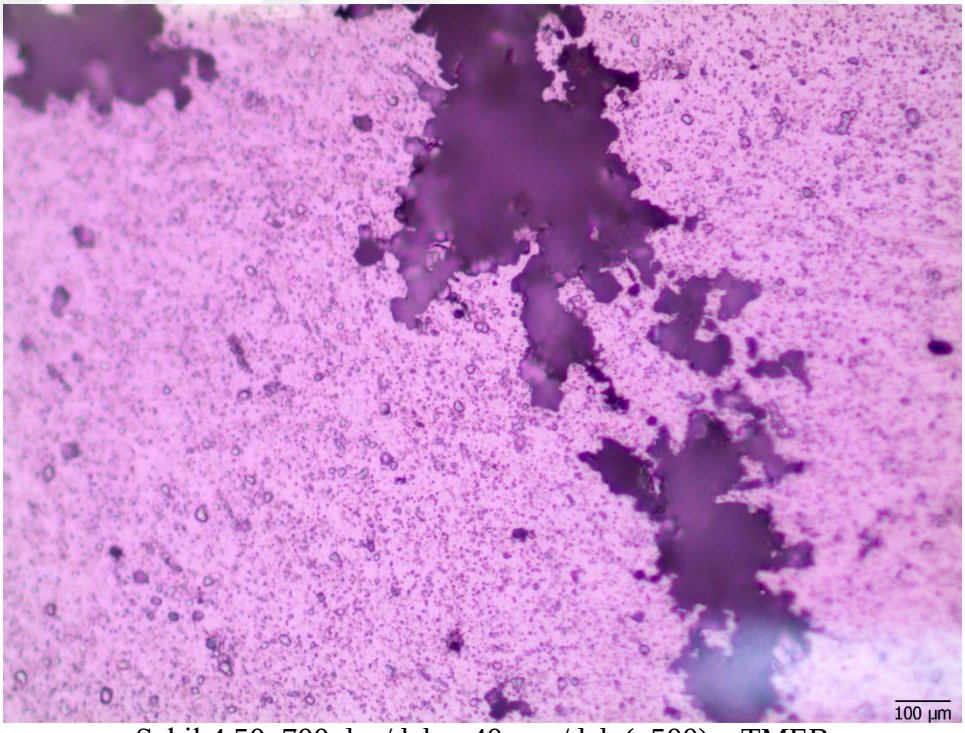
Şekil 4.47. 700 dev/dak – 40 mm/dak (x50) – DYKB



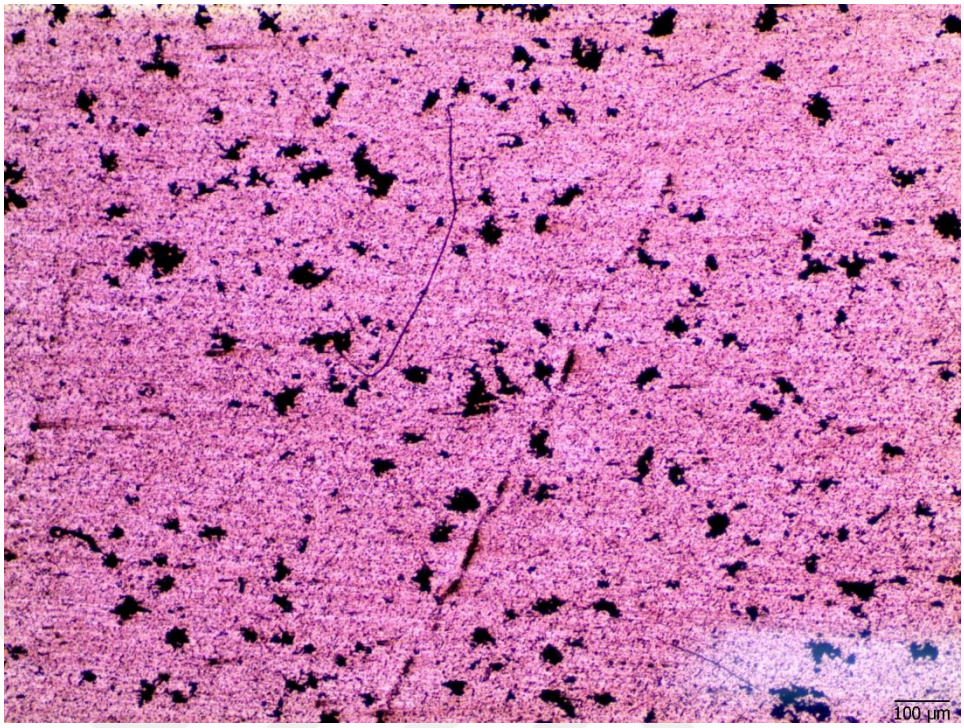
Şekil 4.48. 700 dev/dak – 40 mm/dak (x500) – DYKB



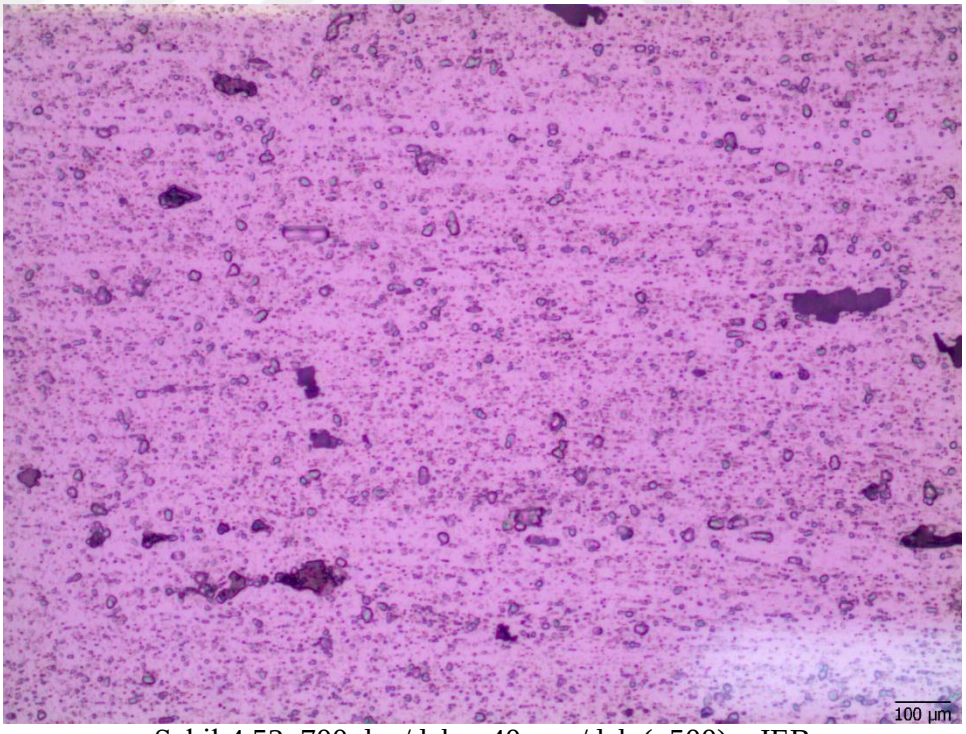
Şekil 4.49. 700 dev/dak – 40 mm/dak (x50) – TMEB



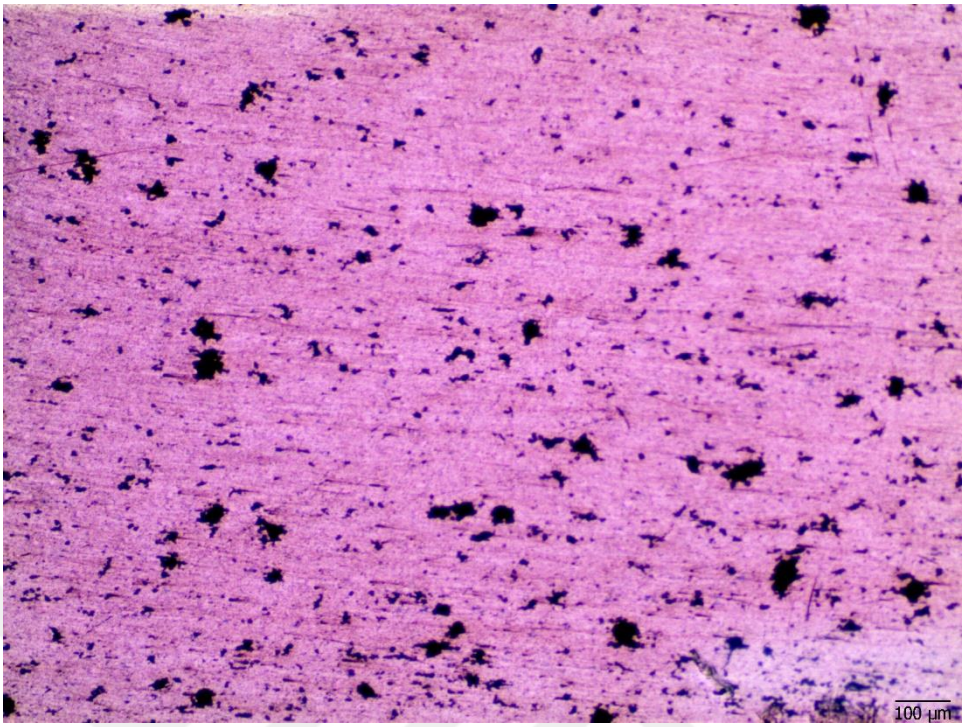
Şekil 4.50. 700 dev/dak – 40 mm/dak (x500) – TMEB



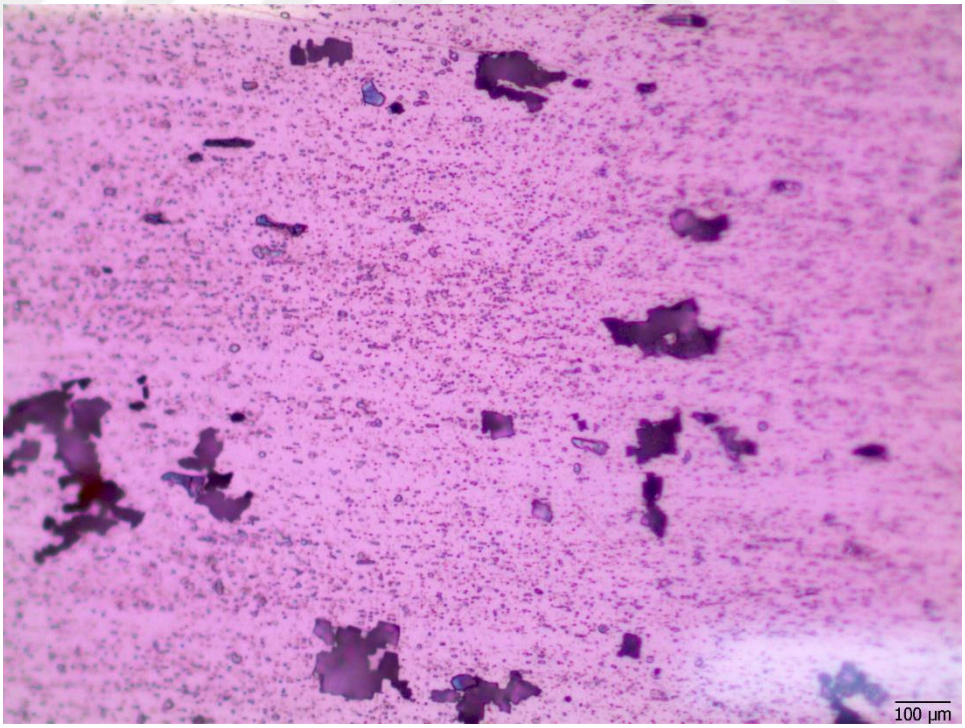
Şekil 4.51. 700 dev/dak – 40 mm/dak (x50) – IEB



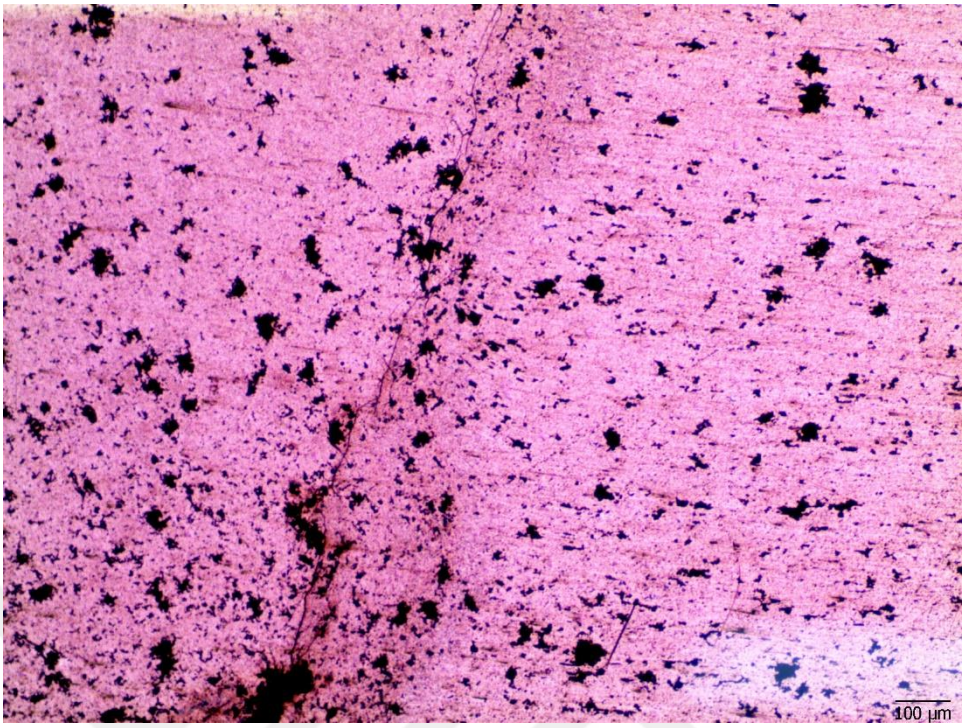
Şekil 4.52. 700 dev/dak – 40 mm/dak (x500) – IEB



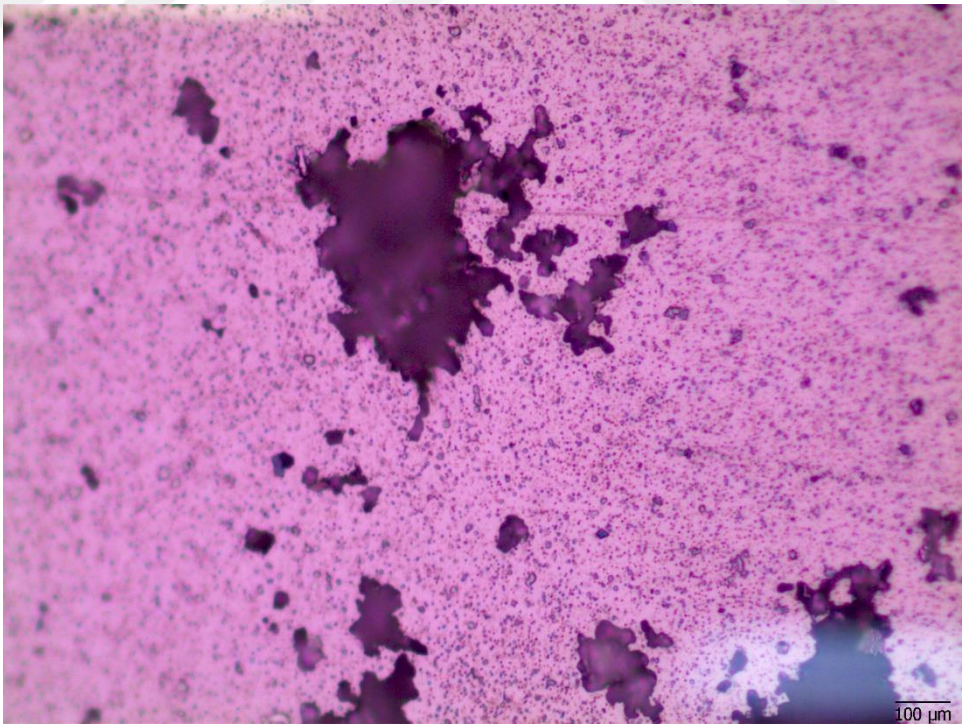
Şekil 4.53. 800 dev/dak – 40 mm/dak (x50) – DYKB



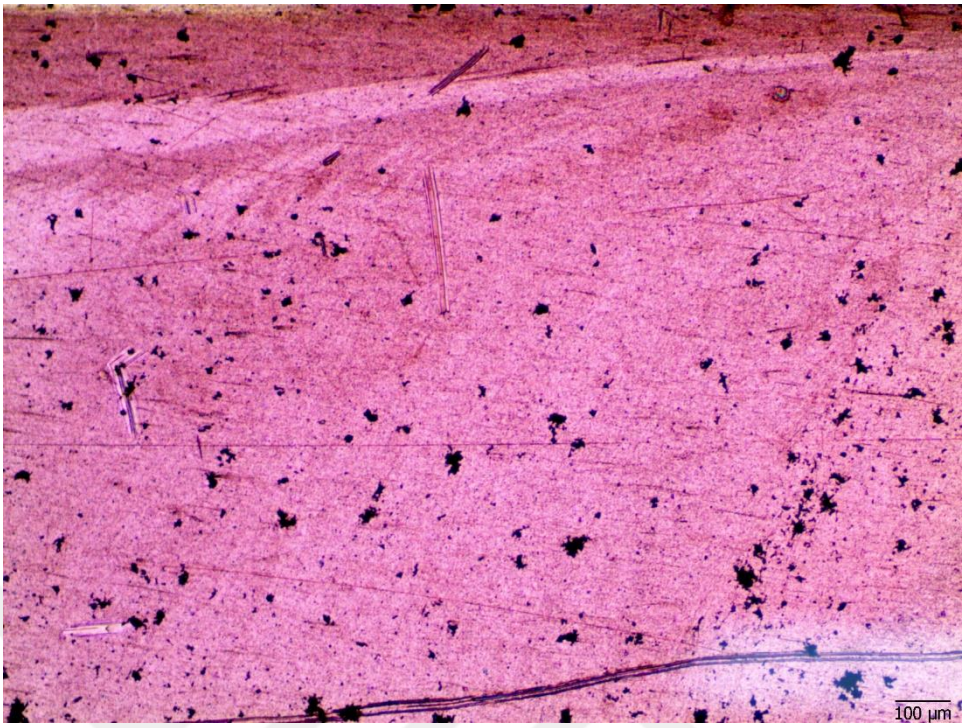
Şekil 4.54. 800 dev/dak – 40 mm/dak (x500) – DYKB



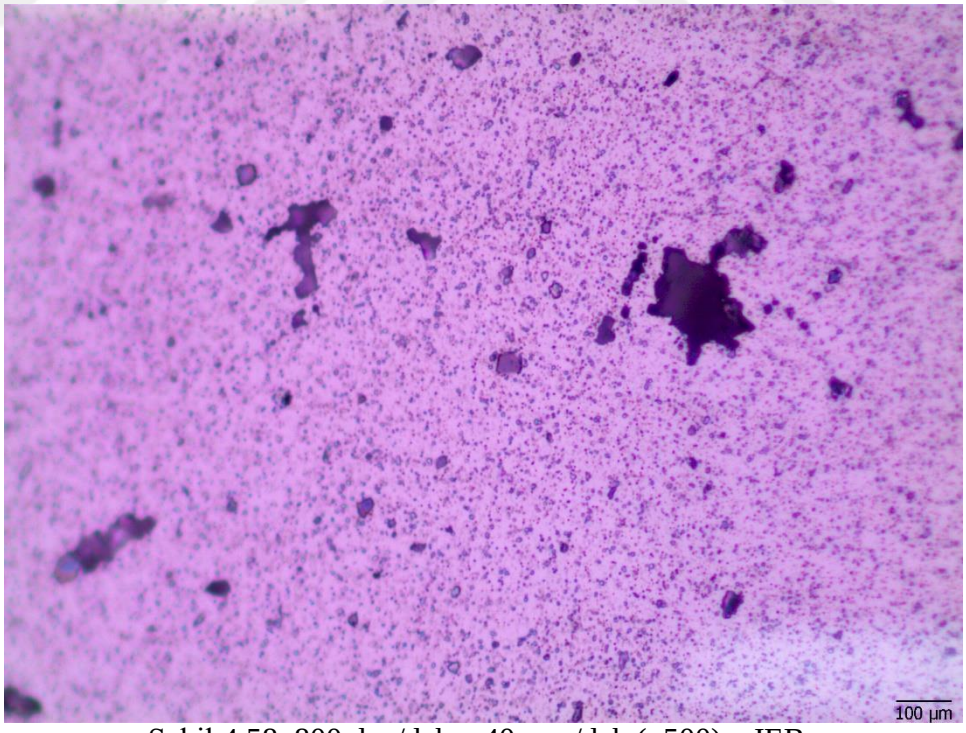
Şekil 4.55. 800 dev/dak – 40 mm/dak (x50) – TMEB



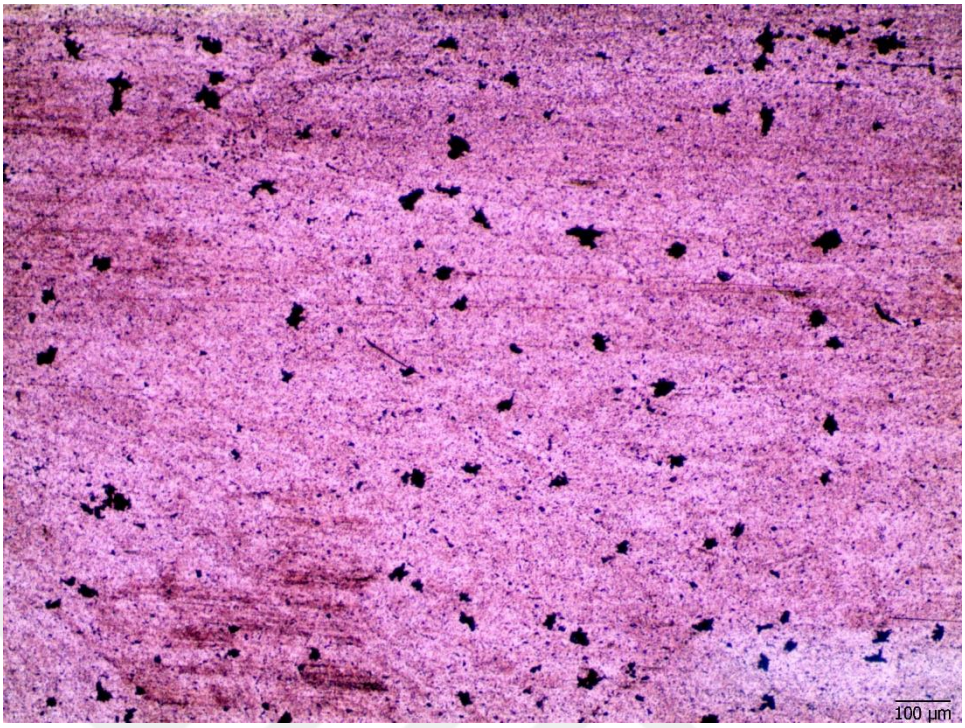
Şekil 4.56. 800 dev/dak – 40 mm/dak (x500) – TMEB



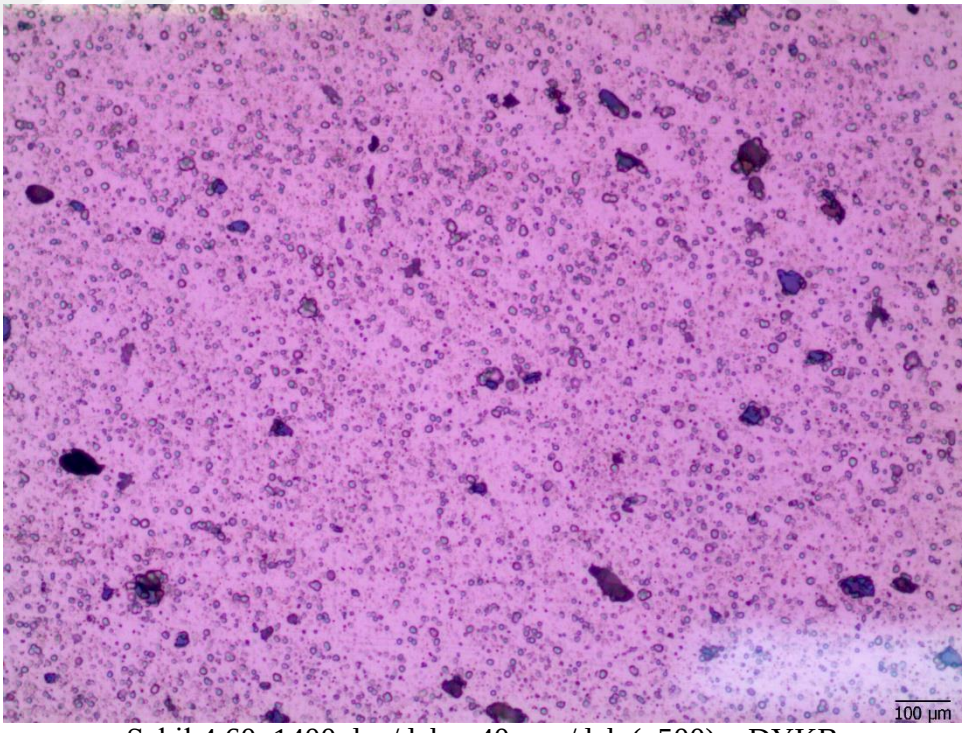
Şekil 4.57. 800 dev/dak – 40 mm/dak (x50) – IEB



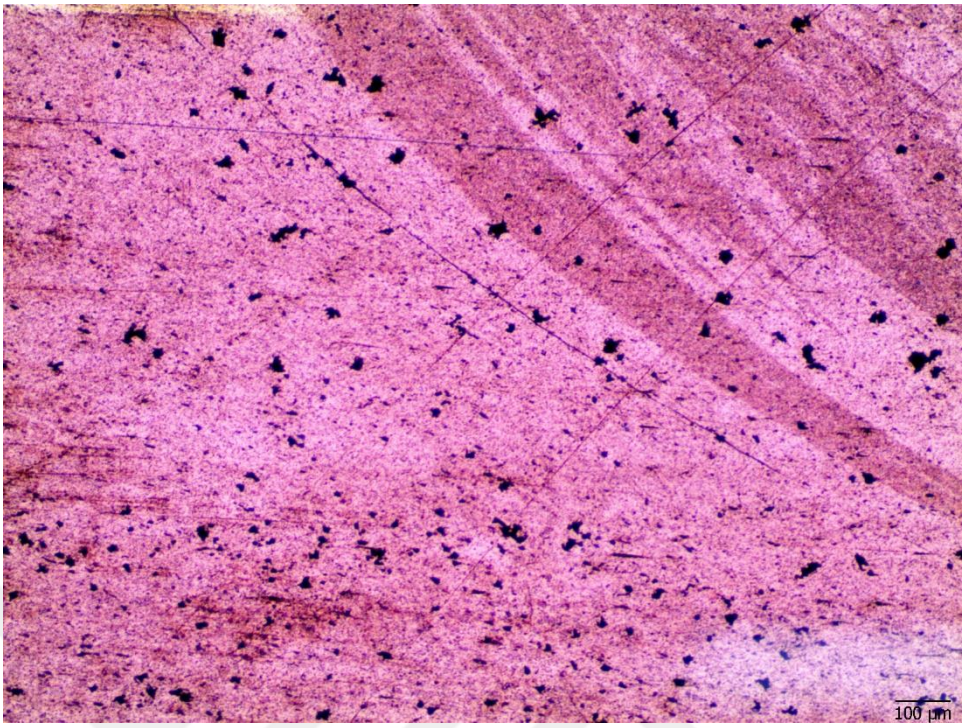
Şekil 4.58. 800 dev/dak – 40 mm/dak (x500) – IEB



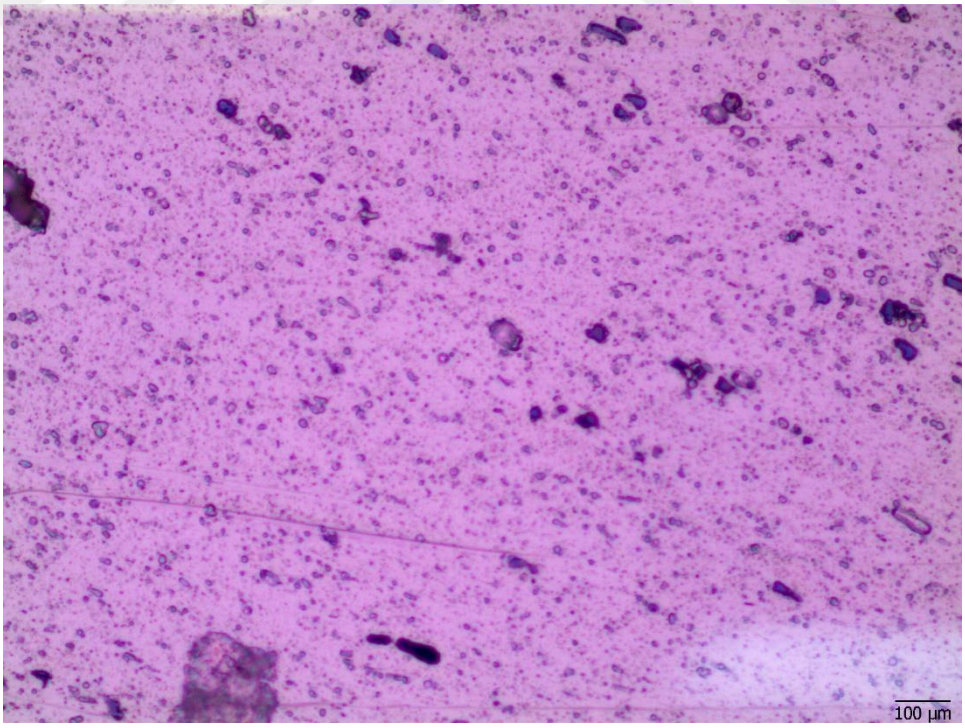
Şekil 4.59. 1400 dev/dak – 40 mm/dak (x50) – DYKB



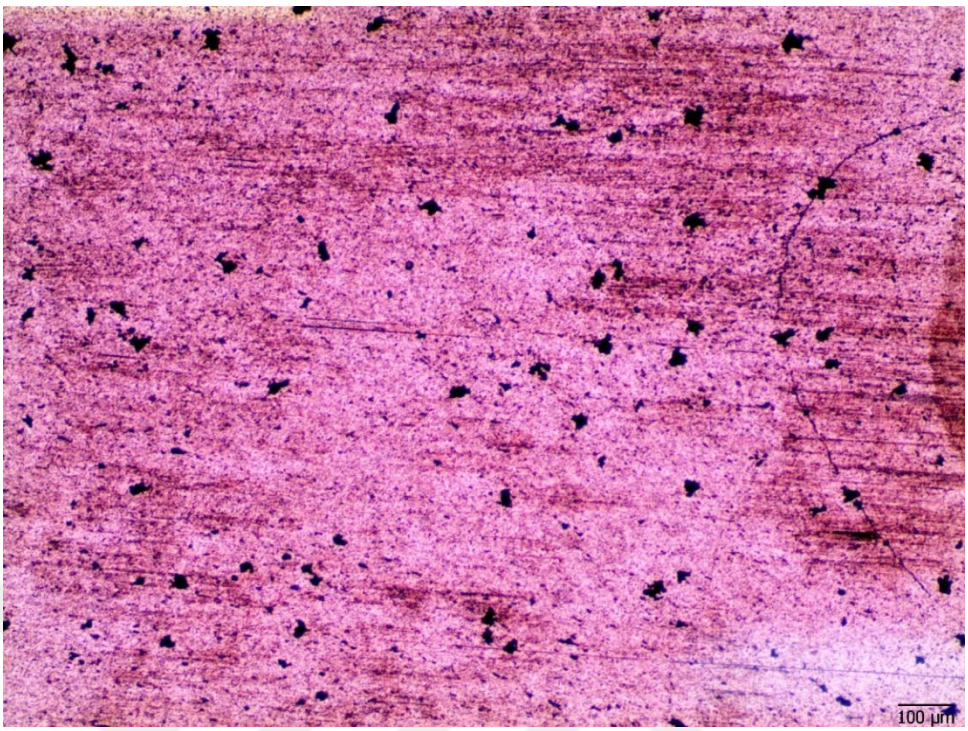
Şekil 4.60. 1400 dev/dak – 40 mm/dak (x500) – DYKB



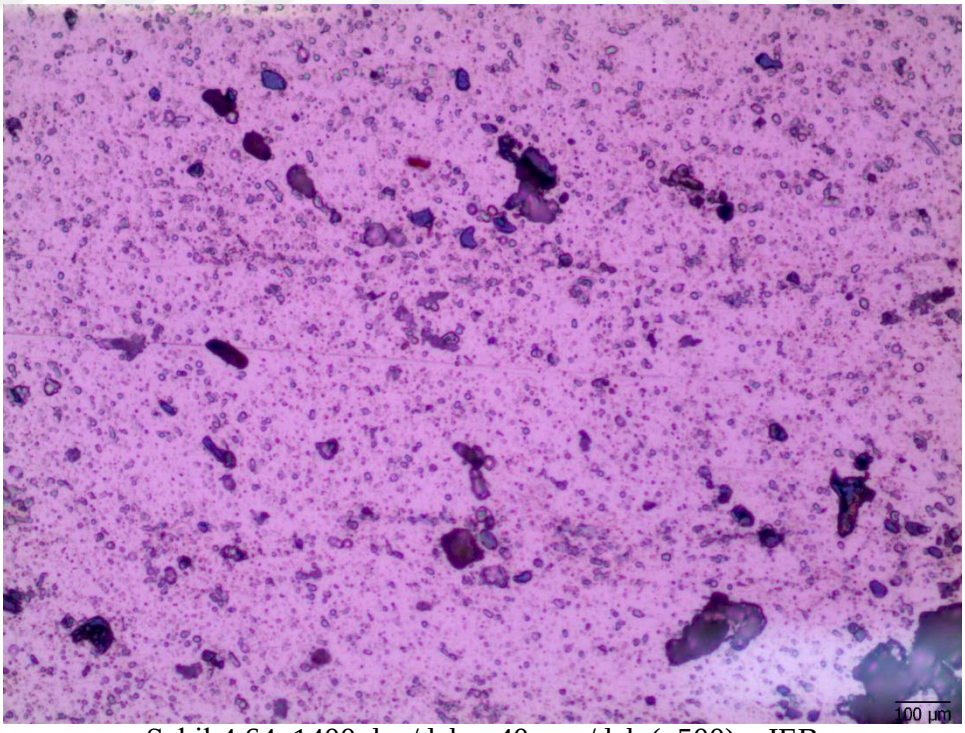
Şekil 4.61. 1400 dev/dak – 40 mm/dak (x50) – TMEB



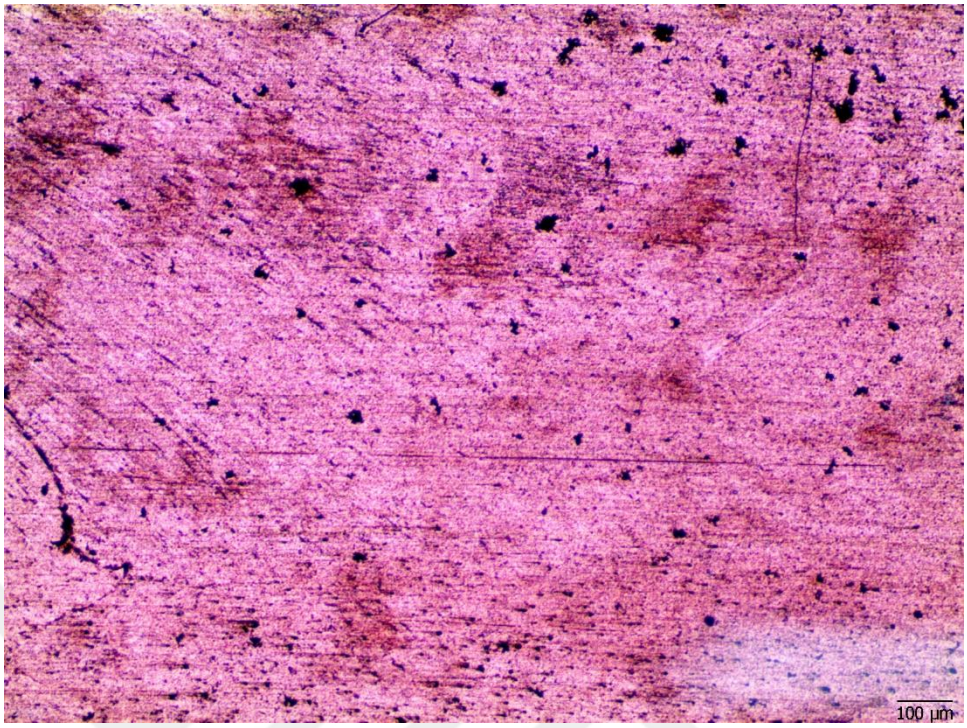
Şekil 4.62. 1400 dev/dak – 40 mm/dak (x500) – TMEB



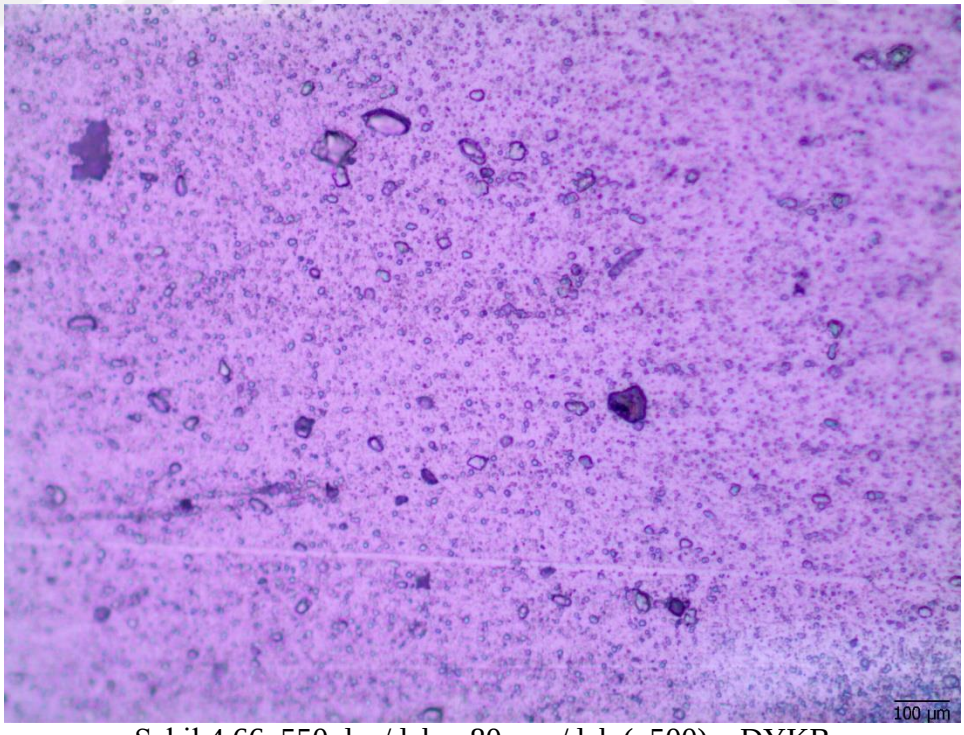
Şekil 4.63. 1400 dev/dak – 40 mm/dak (x50) – IEB



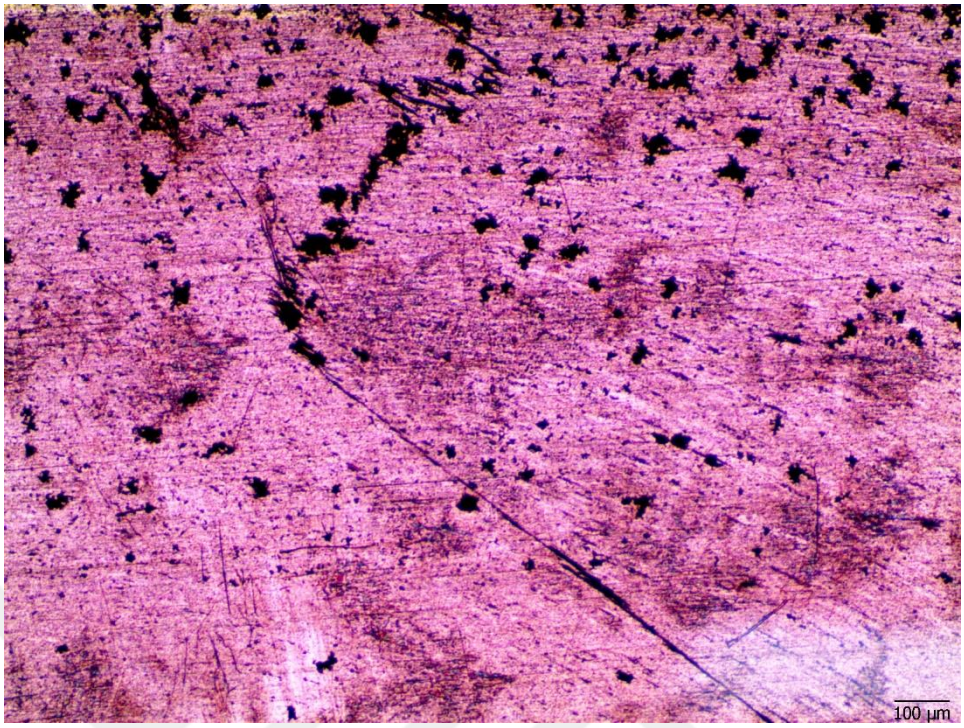
Şekil 4.64. 1400 dev/dak – 40 mm/dak (x500) – IEB



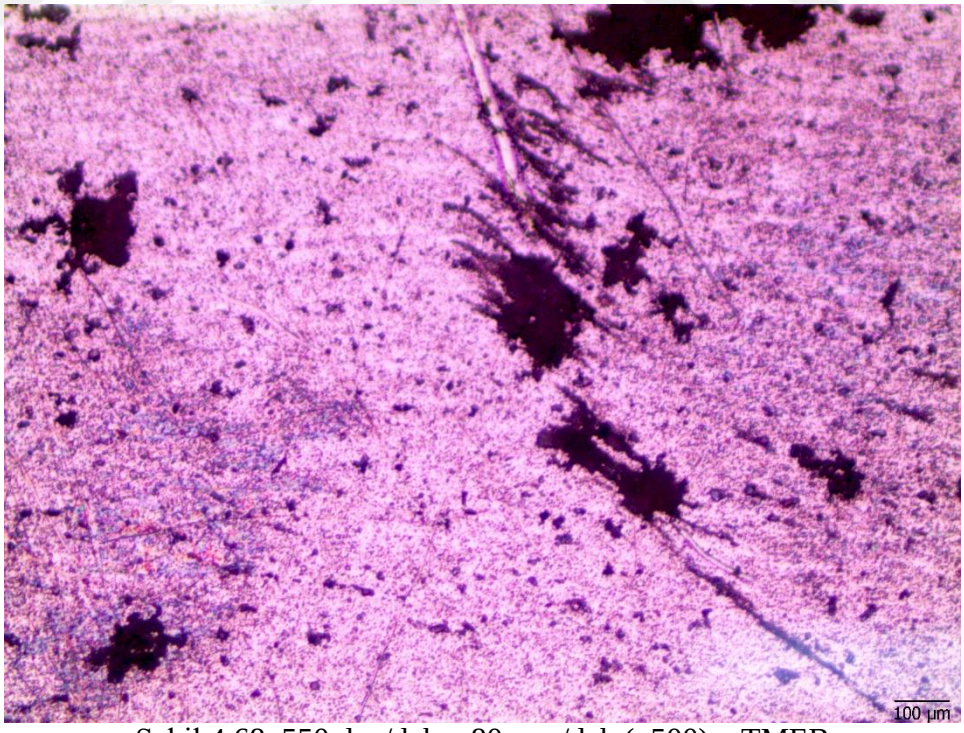
Şekil 4.65. 550 dev/dak – 80 mm/dak (x50) – DYKB



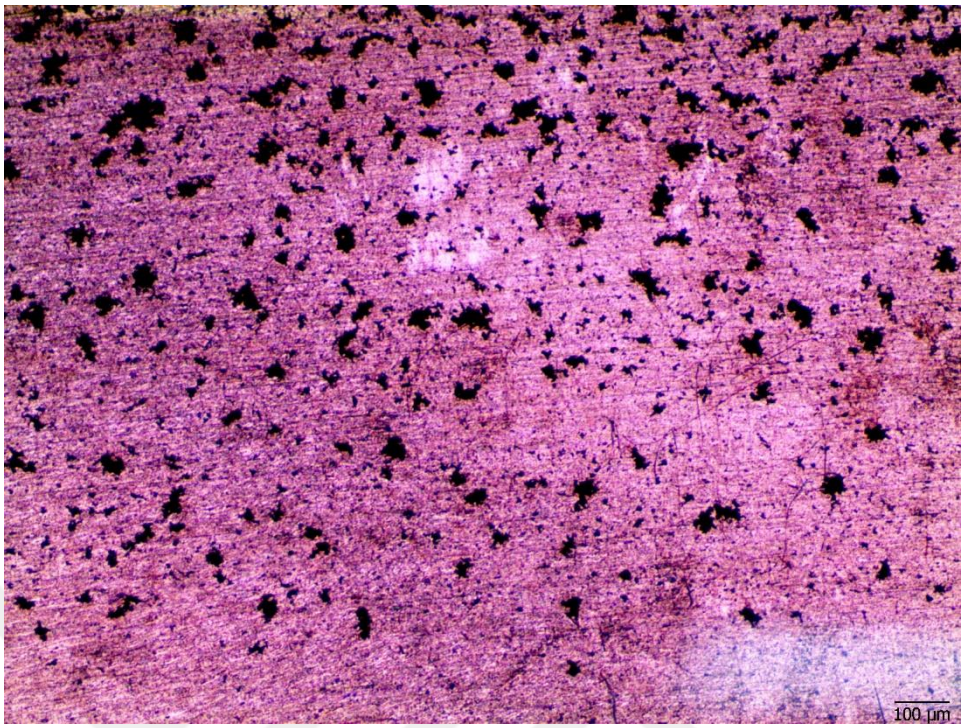
Şekil 4.66. 550 dev/dak – 80 mm/dak (x500) – DYKB



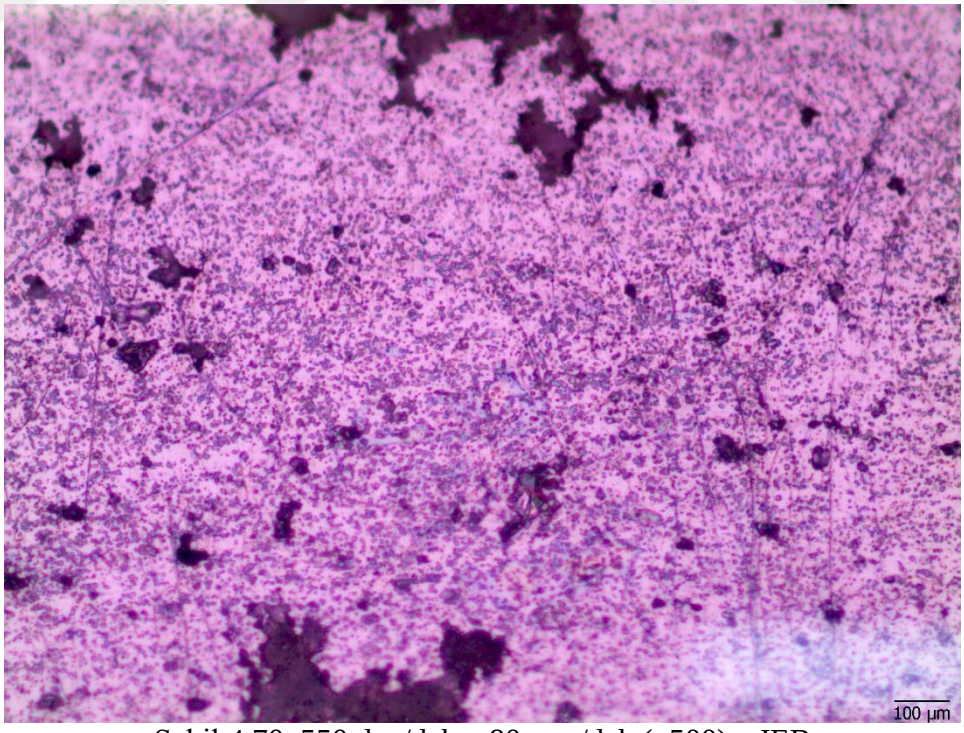
Şekil 4.67. 550 dev/dak – 80 mm/dak (x50) – TMEB



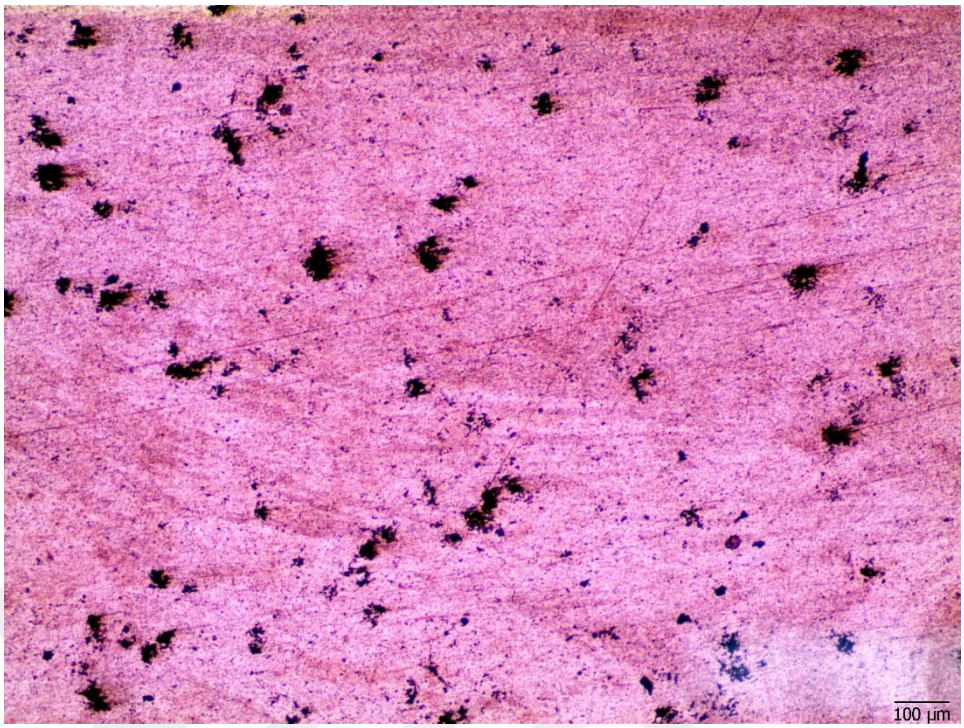
Şekil 4.68. 550 dev/dak – 80 mm/dak (x500) – TMEB



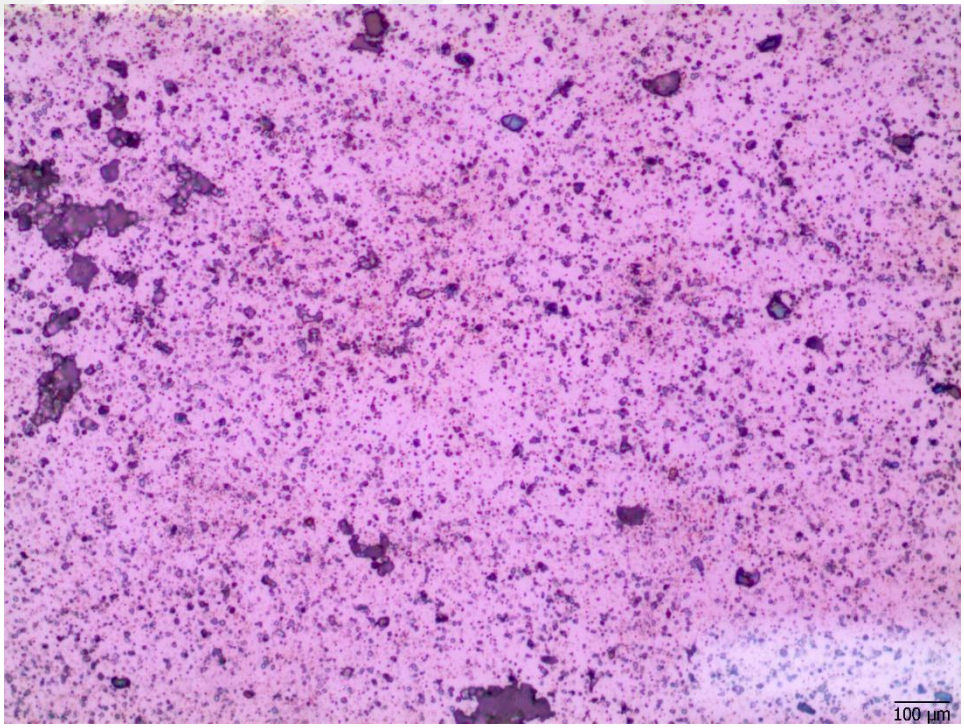
Şekil 4.69. 550 dev/dak – 80 mm/dak (x50) – IEB



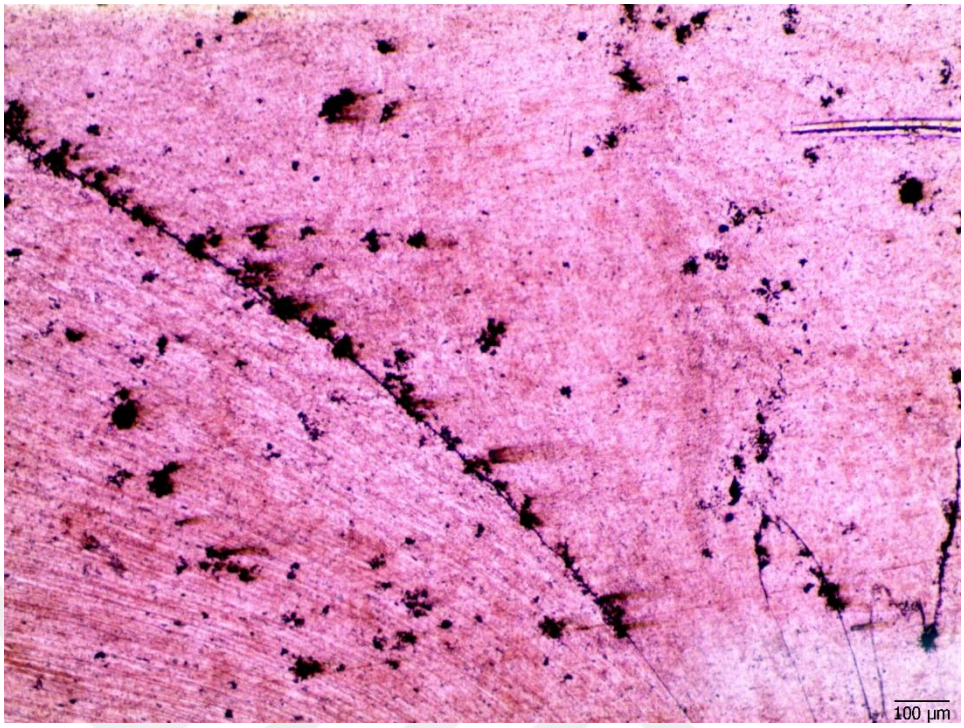
Şekil 4.70. 550 dev/dak – 80 mm/dak (x500) – IEB



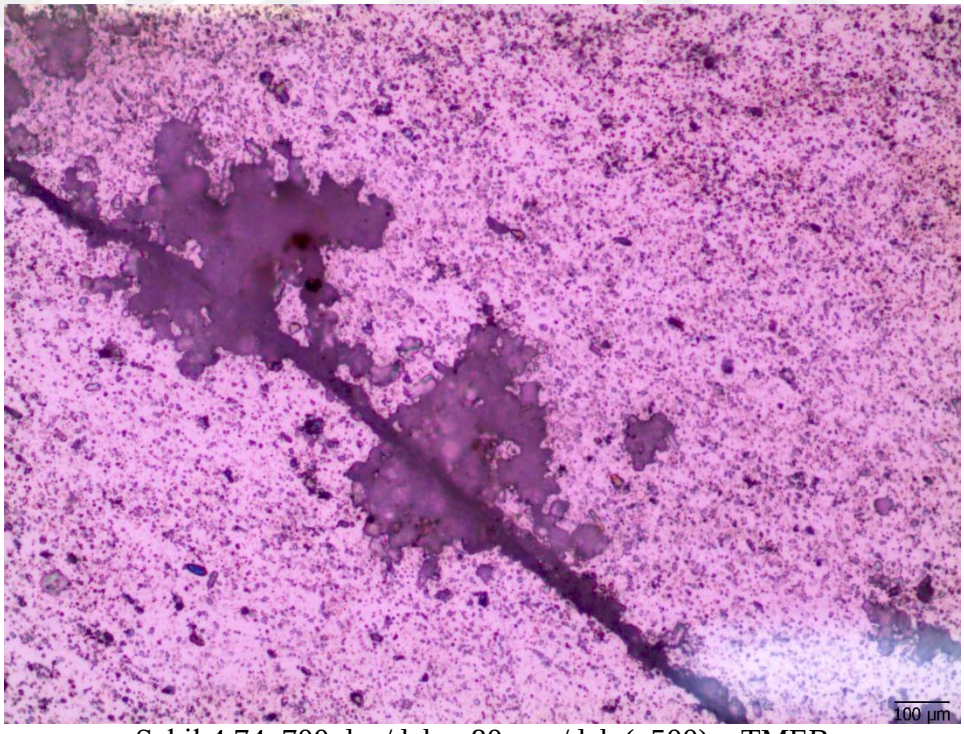
Şekil 4.71. 700 dev/dak – 80 mm/dak (x50) – DYKB



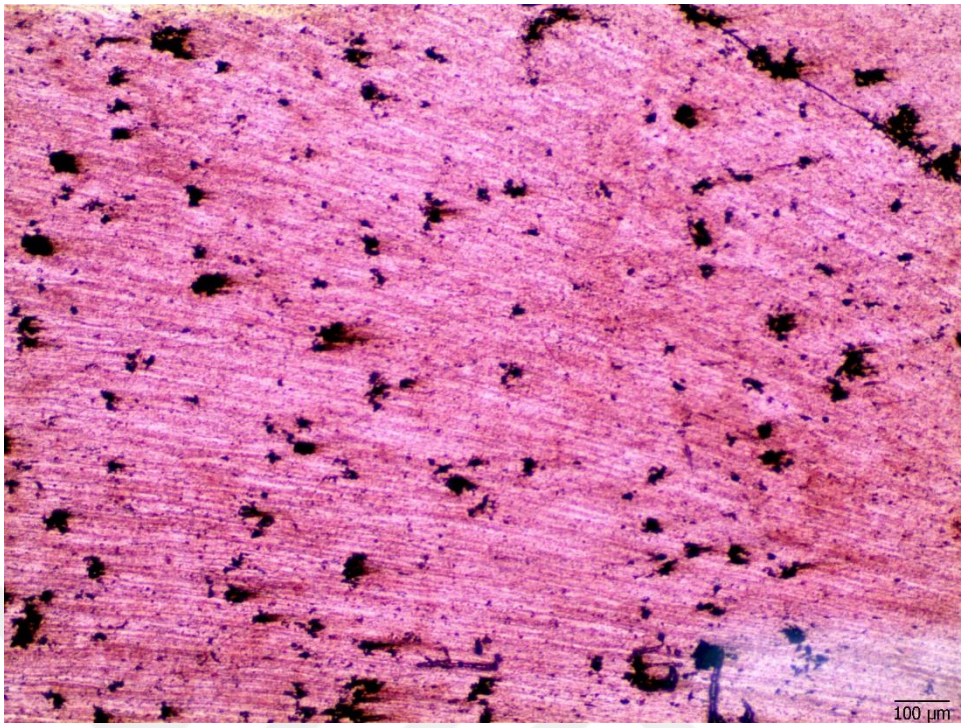
Şekil 4.72. 700 dev/dak – 80 mm/dak (x500) – DYKB



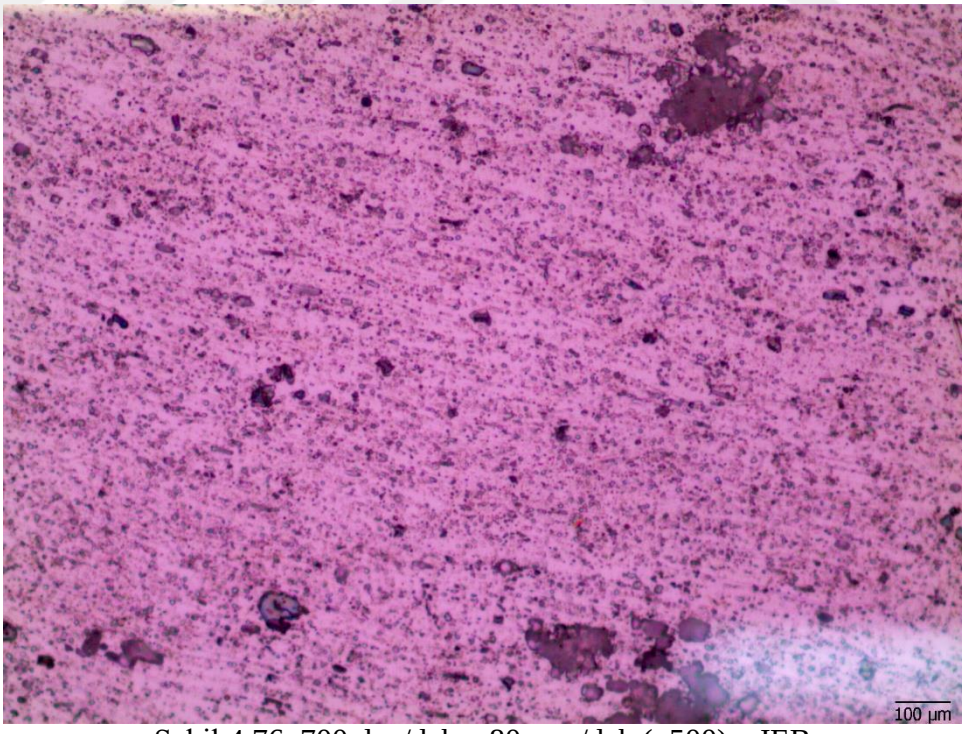
Şekil 4.73. 700 dev/dak – 80 mm/dak (x50) – TMEB



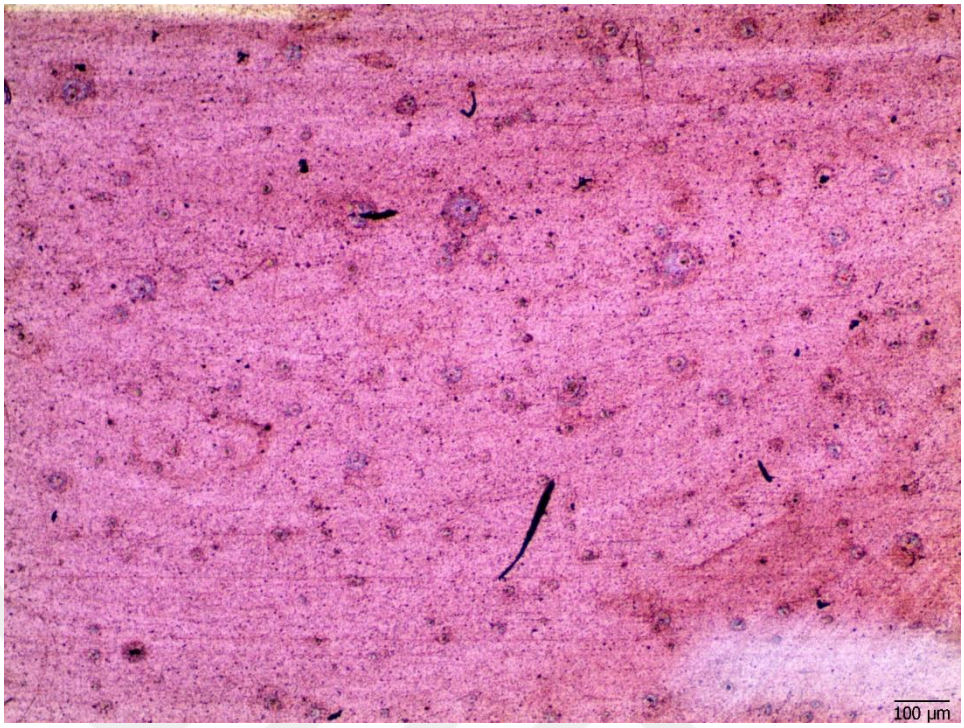
Şekil 4.74. 700 dev/dak – 80 mm/dak (x500) – TMEB



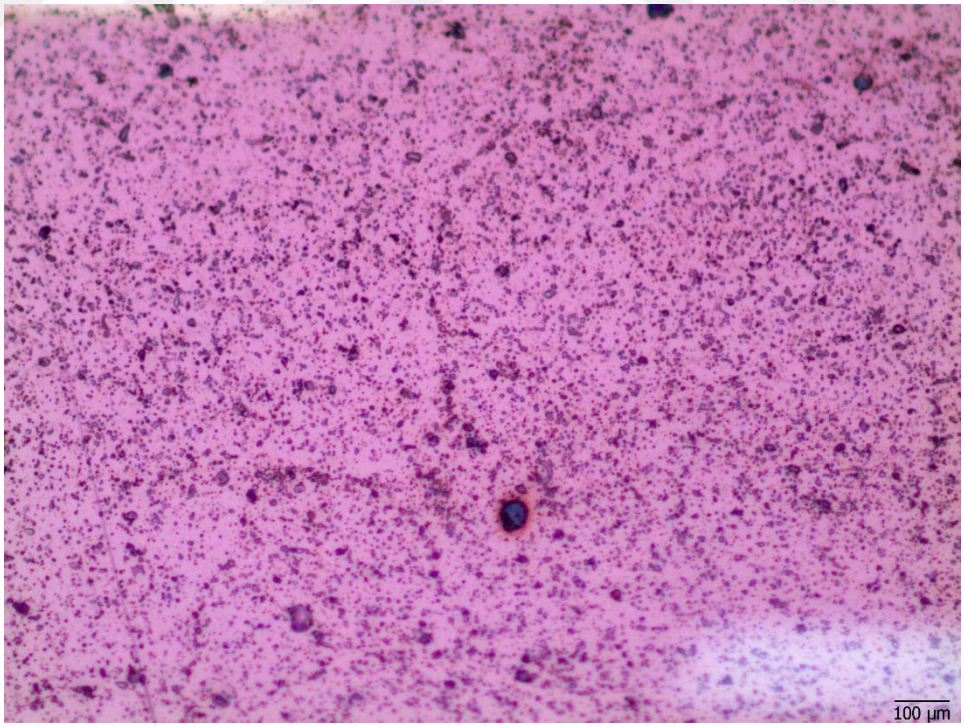
Şekil 4.75. 700 dev/dak – 80 mm/dak (x50) – IEB



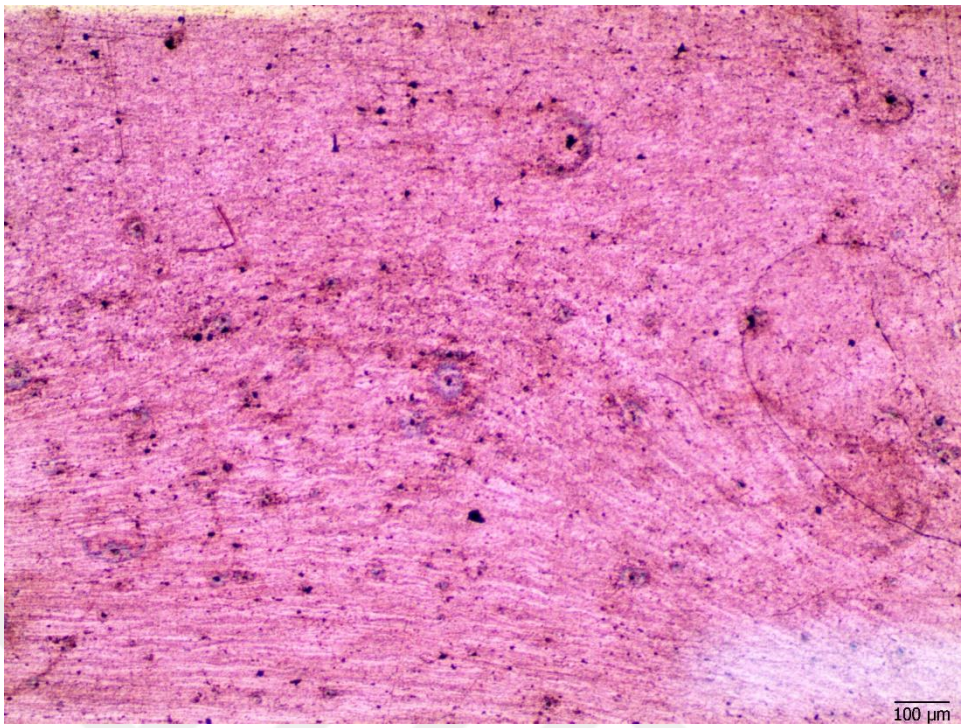
Şekil 4.76. 700 dev/dak – 80 mm/dak (x500) – IEB



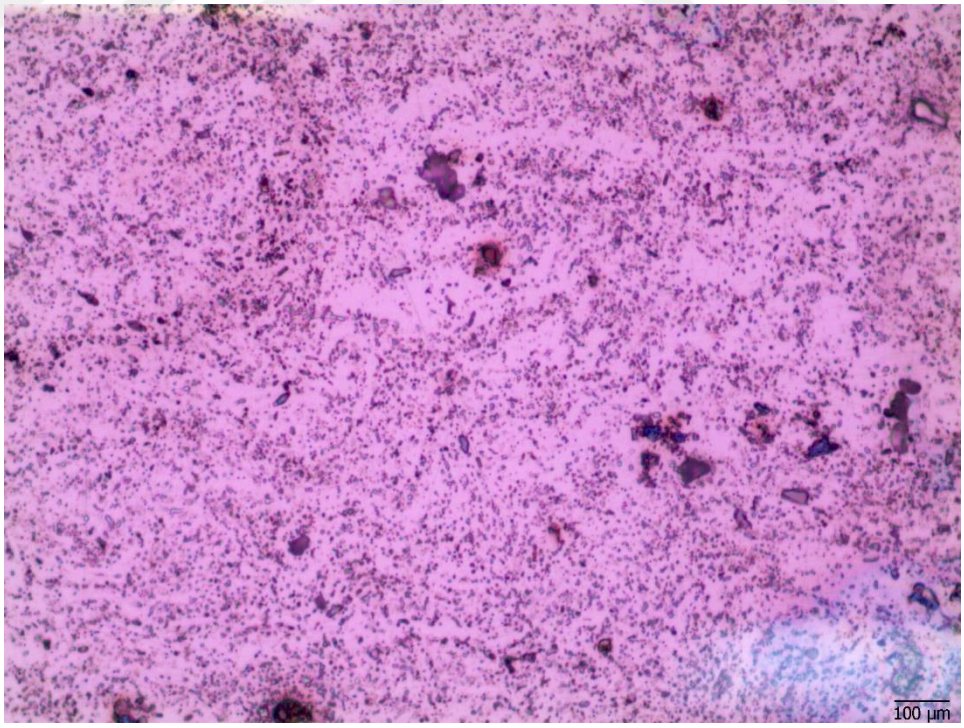
Şekil 4.77. 800 dev/dak – 80 mm/dak (x50) – DYKB



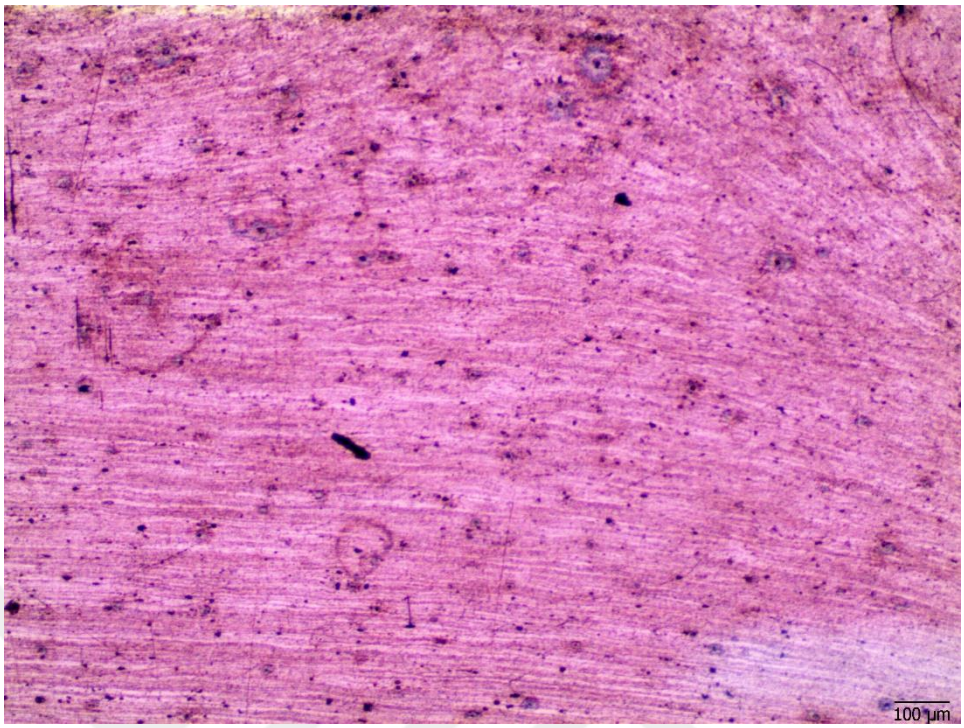
Şekil 4.78. 800 dev/dak – 80 mm/dak (x500) – DYKB



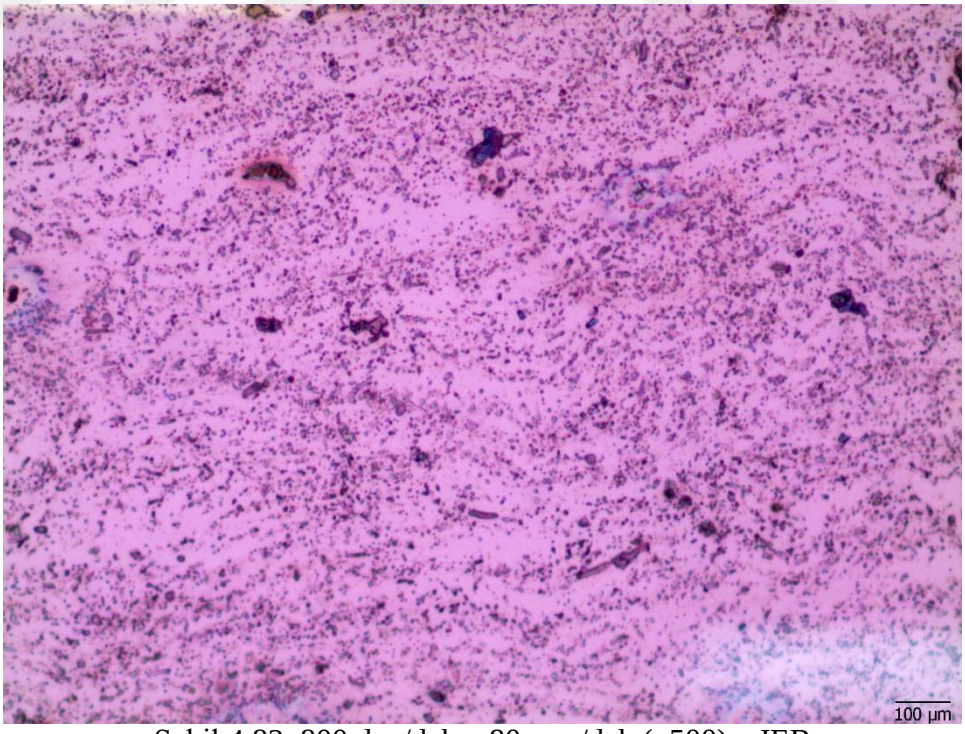
Şekil 4.79. 800 dev/dak – 80 mm/dak (x50) – TMEB



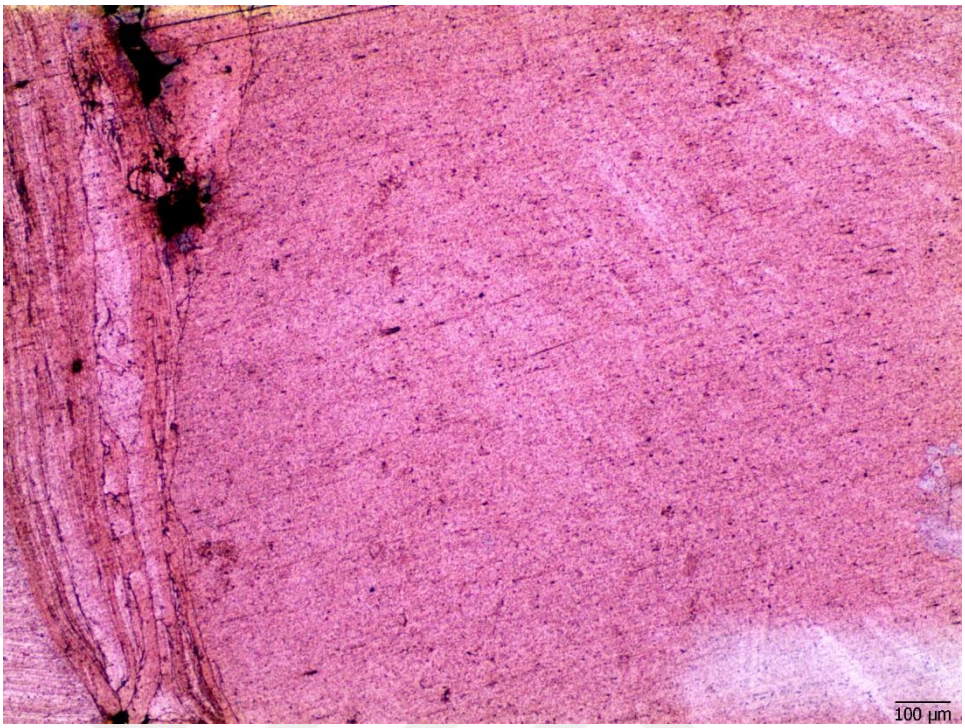
Şekil 4.80. 800 dev/dak – 80 mm/dak (x500) – TMEB



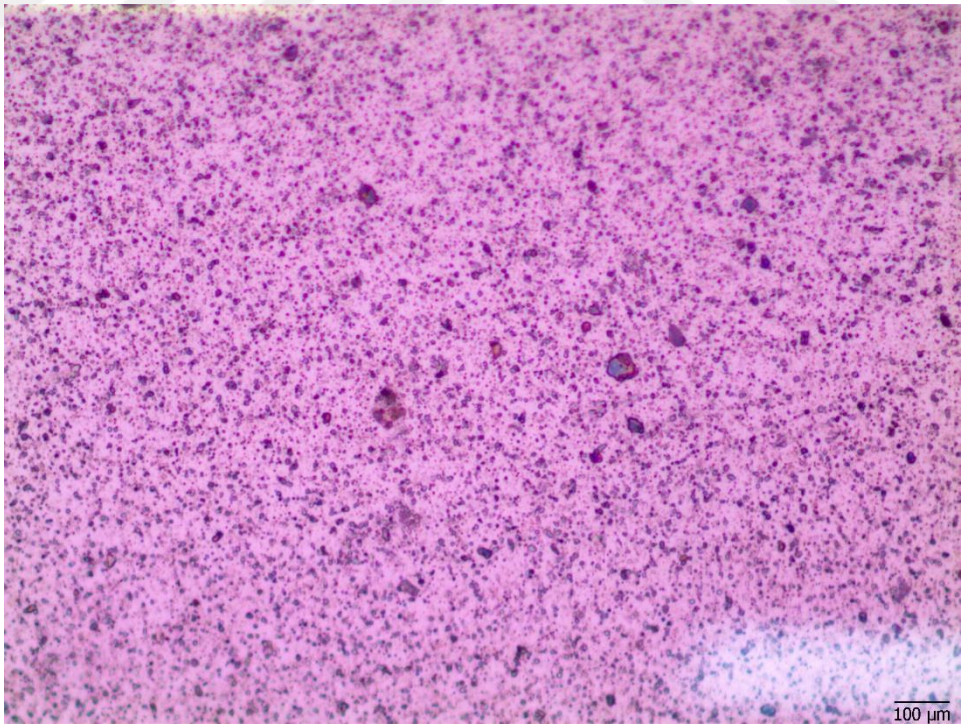
Şekil 4.81. 800 dev/dak – 80 mm/dak (x50) – IEB



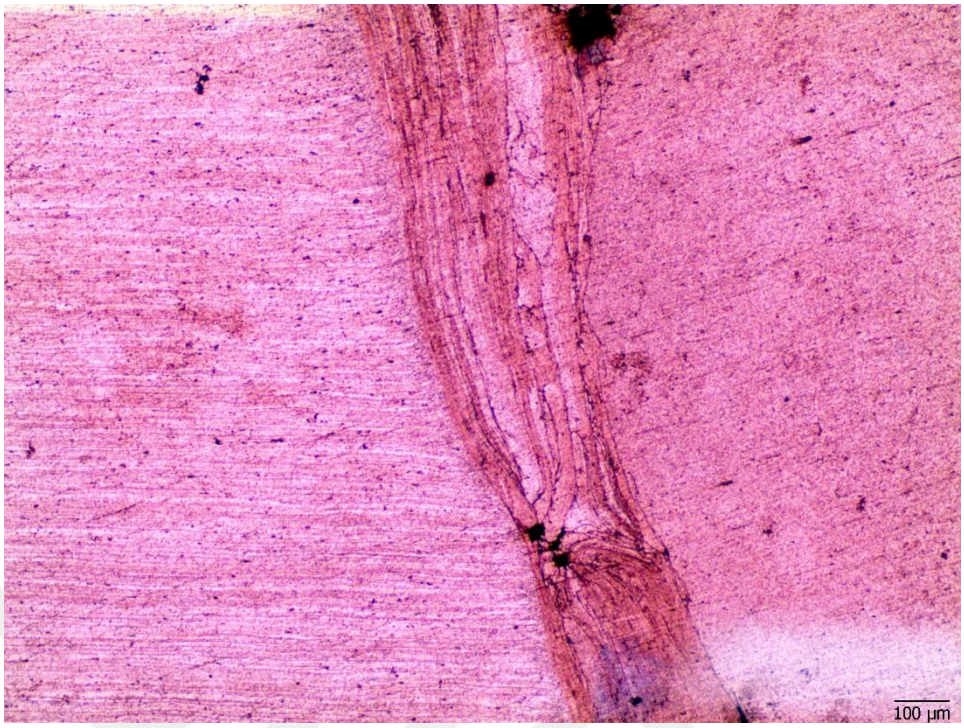
Şekil 4.82. 800 dev/dak – 80 mm/dak (x500) – IEB



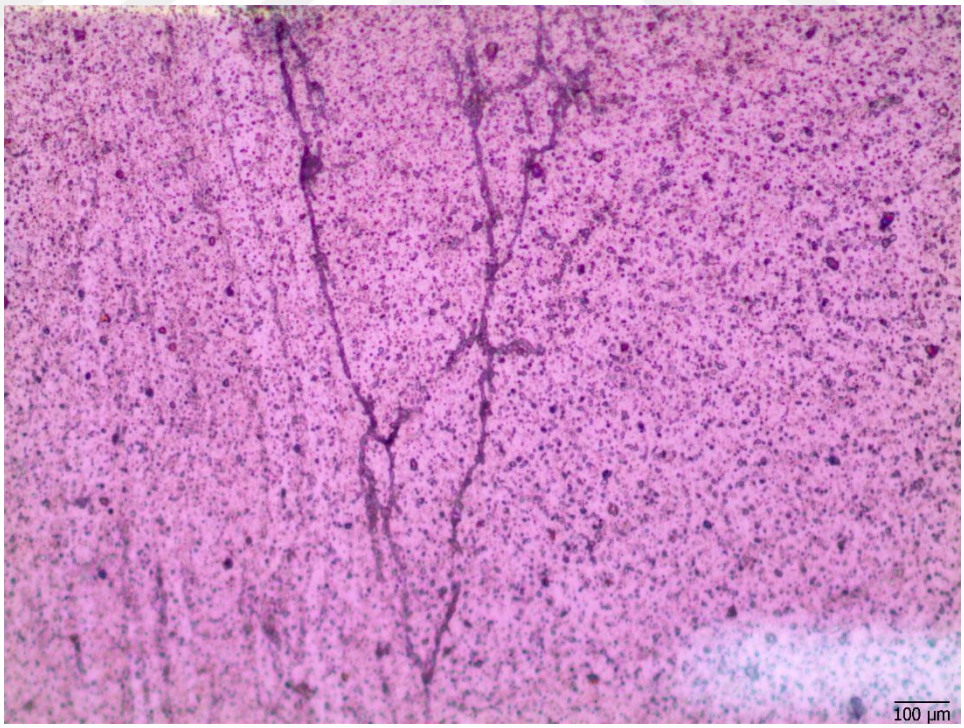
Şekil 4.83. 1400 dev/dak – 80 mm/dak (x50) – DYKB



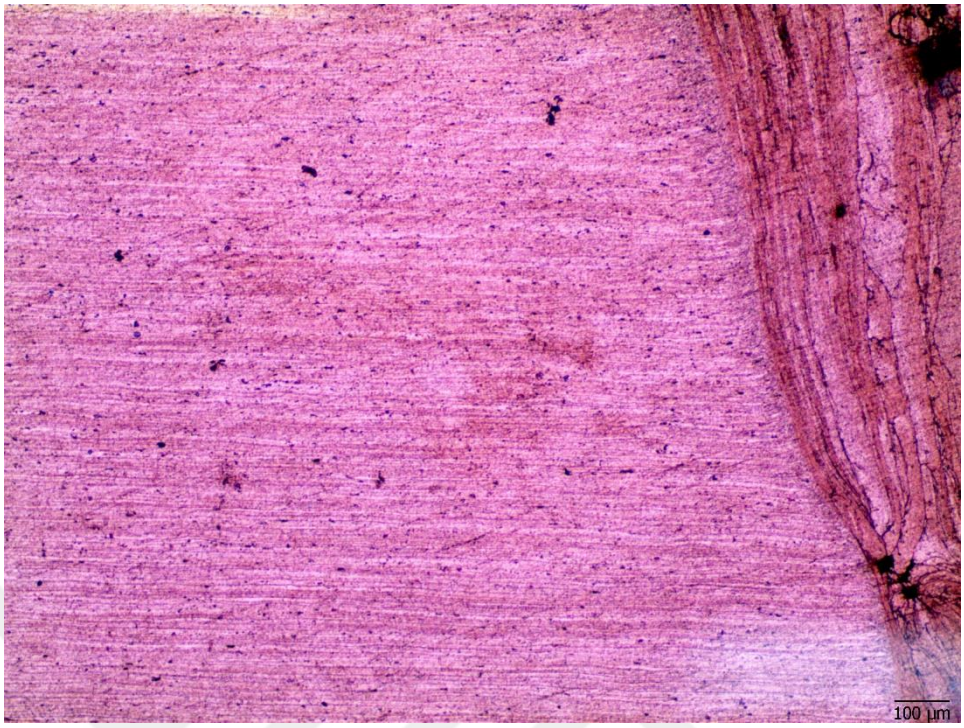
Şekil 4.84. 1400 dev/dak – 80 mm/dak (x500) – DYKB



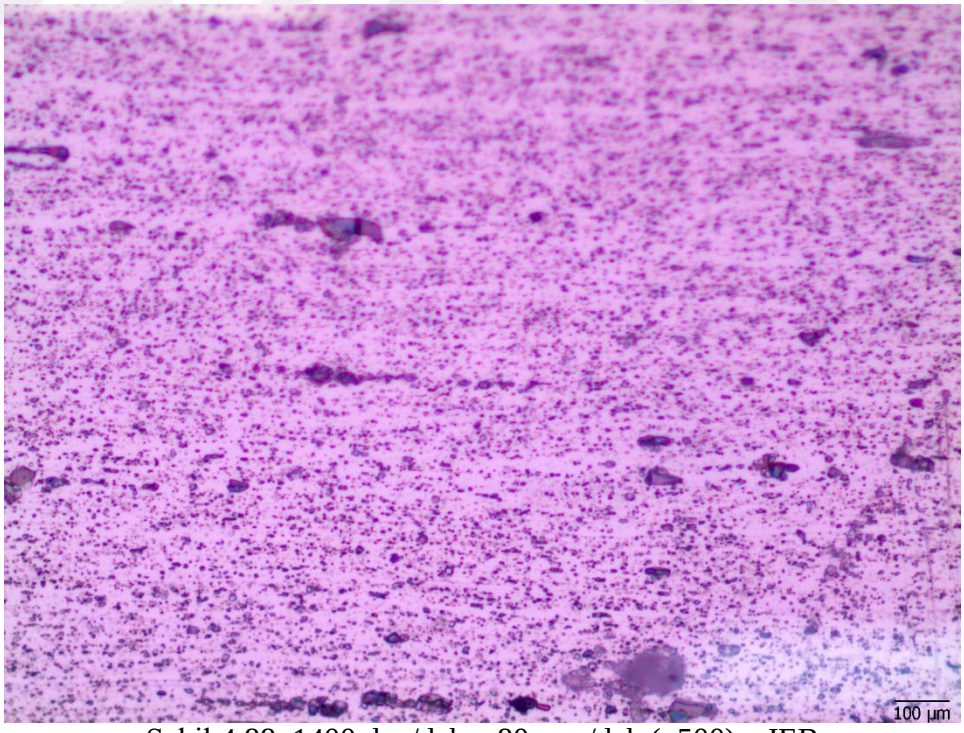
Şekil 4.85. 1400 dev/dak – 80 mm/dak (x50) – TMEB



Şekil 4.86. 1400 dev/dak – 80 mm/dak (x500) – TMEB



Şekil 4.87. 1400 dev/dak – 80 mm/dak (x50) – IEB

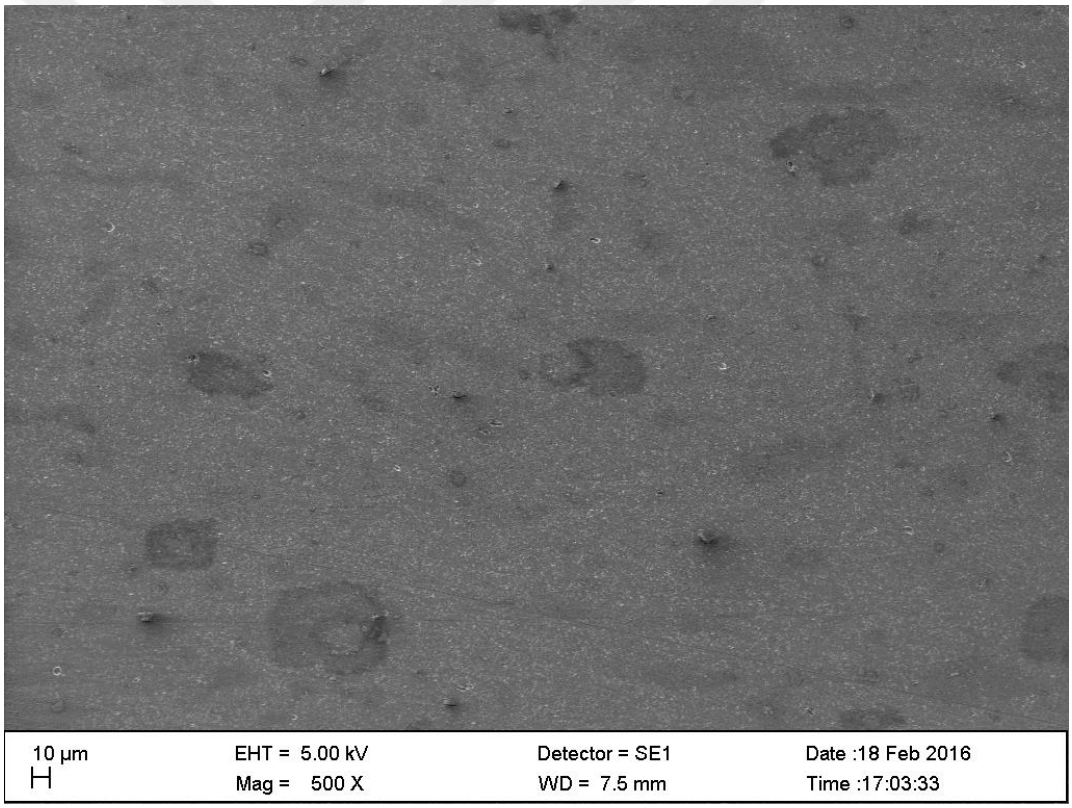


Şekil 4.88. 1400 dev/dak – 80 mm/dak (x500) – IEB

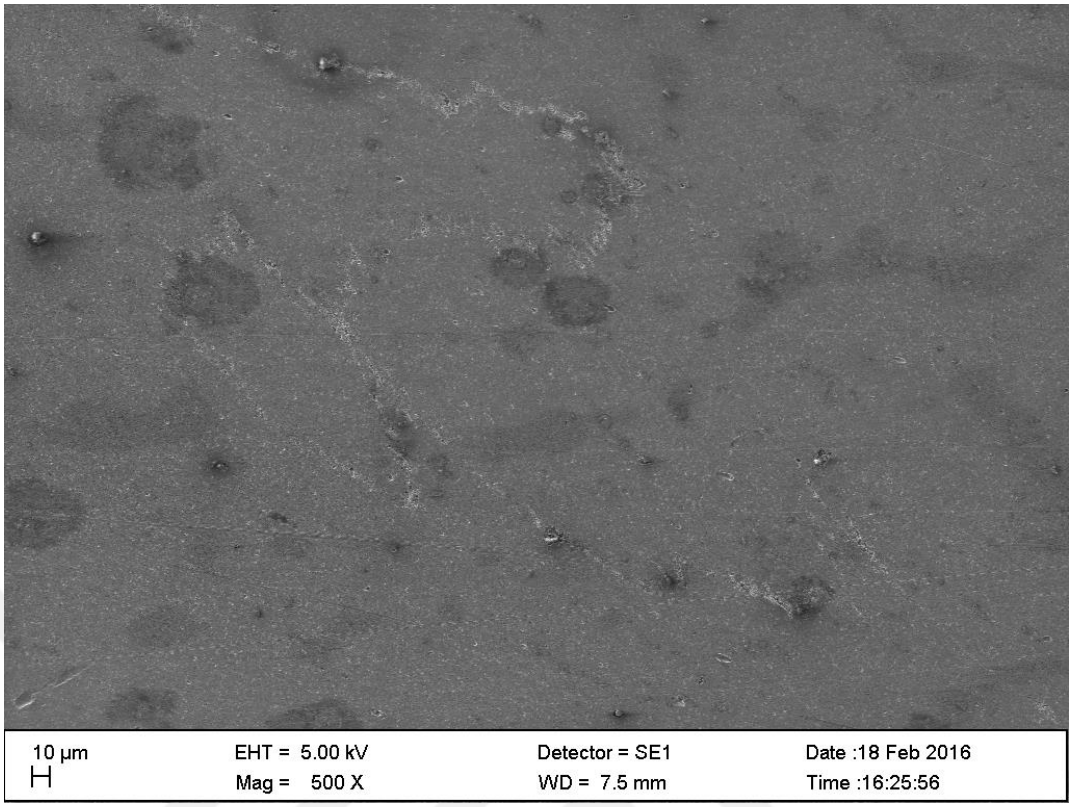
Metal mikroskobundaki 10x, 500x ve 50x, 250x büyütme oranı ile gerçekleştirilen görüntüleme işlemlerinin sonrasında, mikroyapı incelemeleri ve analizleri Zeiss Evo LS10 model elektron mikroskobunda, SEM ve Enerji Dağılımlı X-Ray (EDX) analizleri gerçekleştirilmiş ve detaylar aşağıda verilmiştir.

Deney Parametreleri:

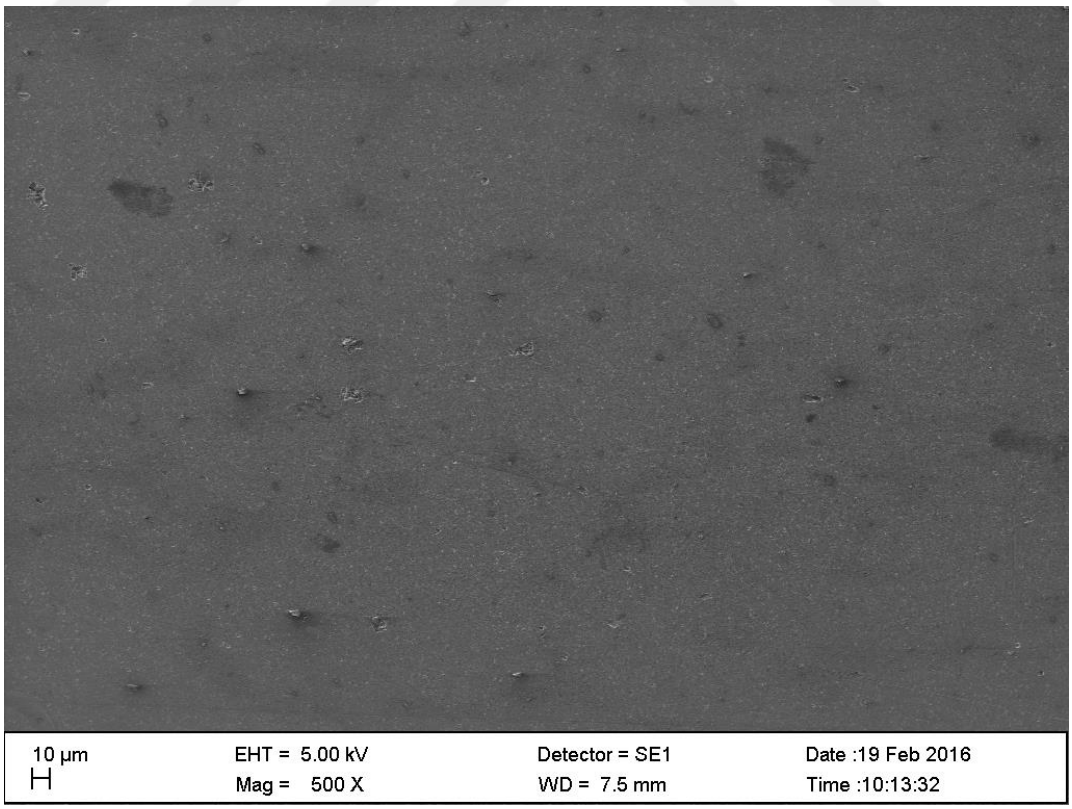
Test metodu	: taramalı elektron mikroskobu
Yüzey durumu	: parlatılmış yüzeyler
Ölçüm aralıkları	: görüntülerde verilmiştir
Büyütme oranları	: 500x, 2500x



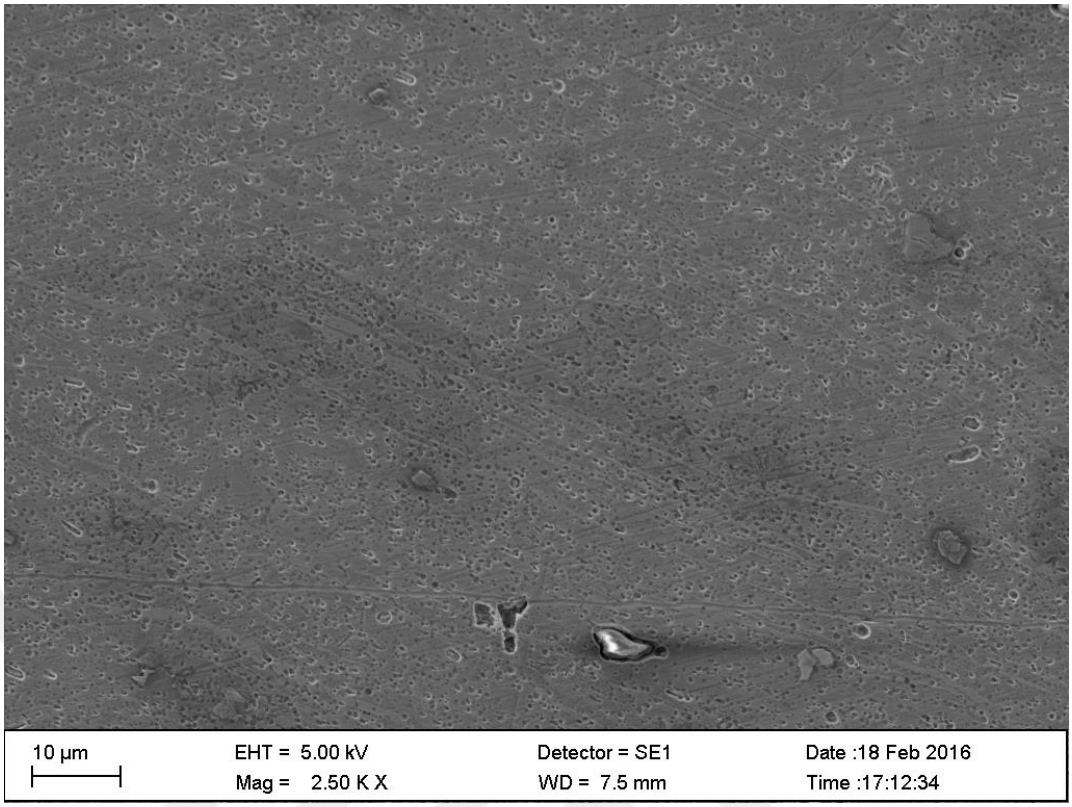
Şekil 4.89. 550 dev/dak – 40 mm/dak (x500) – DYKB



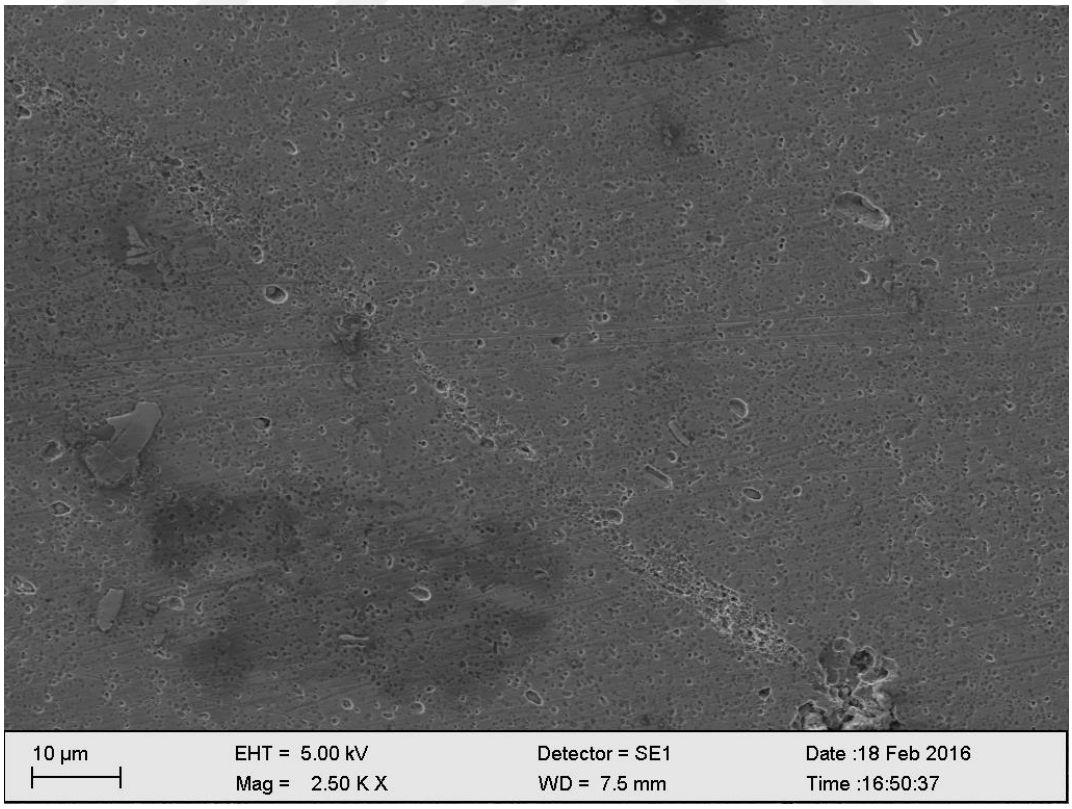
Şekil 4.90. 550 dev/dak – 40 mm/dak (x500) – TMEB



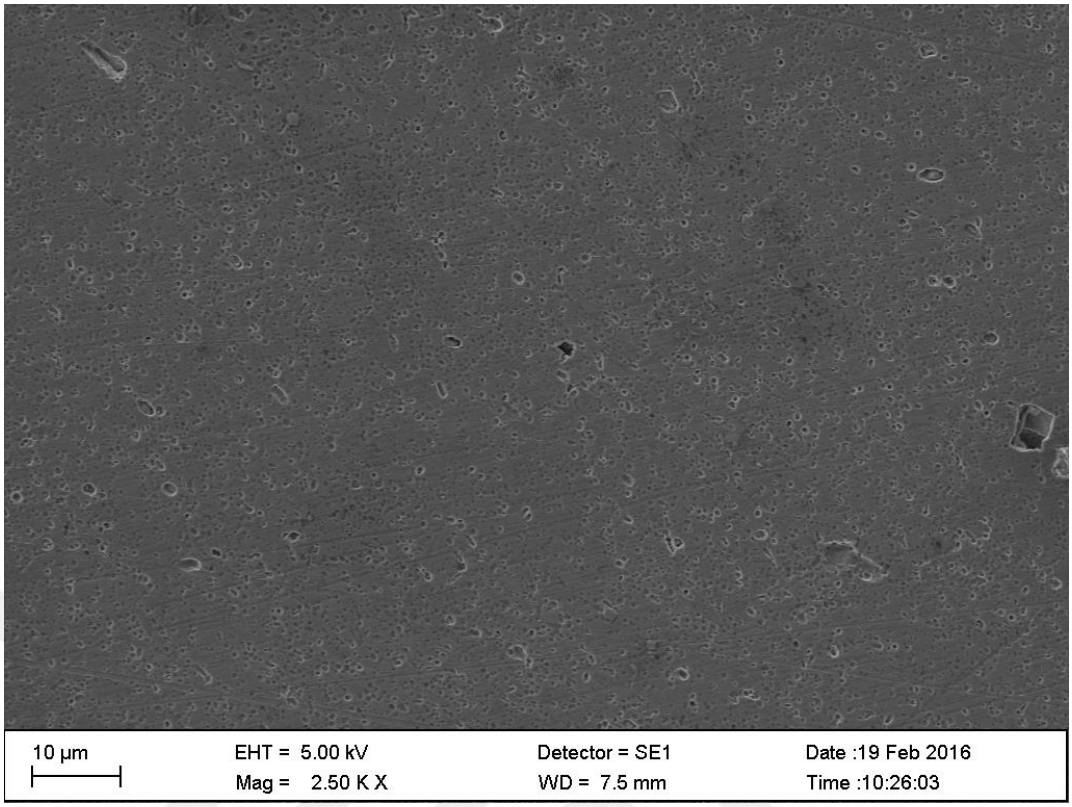
Şekil 4.91. 550 dev/dak – 40 mm/dak (x500) – IEB



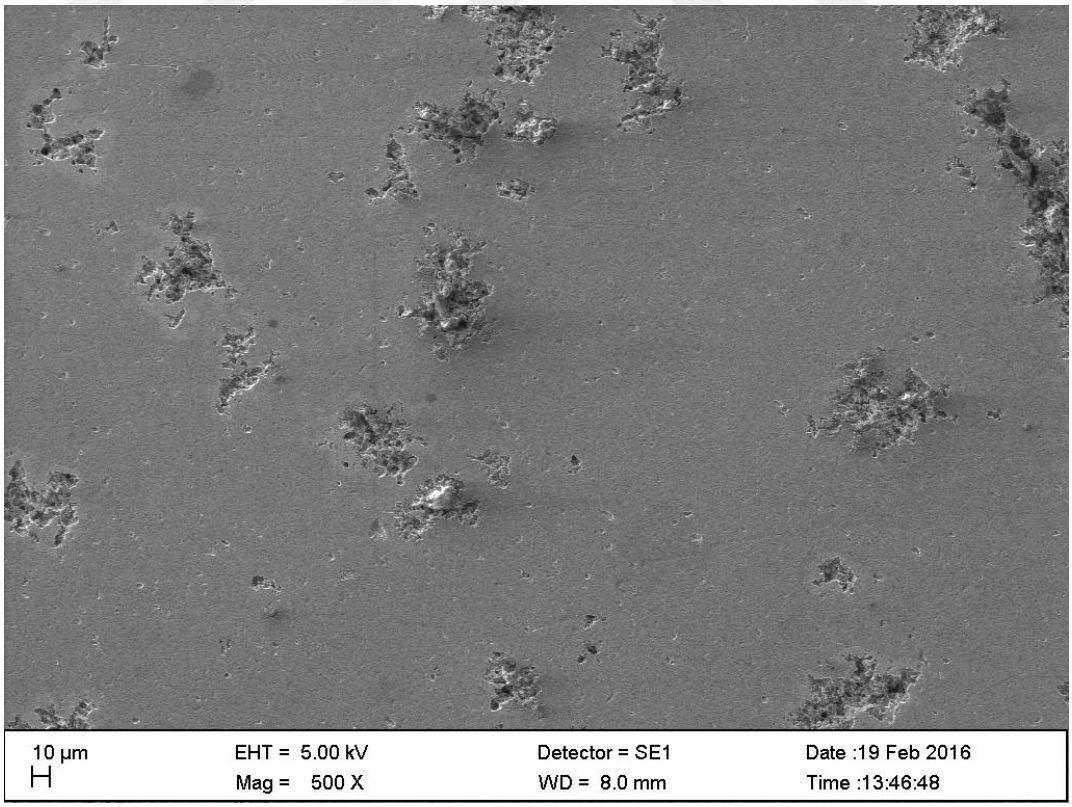
Şekil 4.92. 550 dev/dak – 40 mm/dak (x2500) – DYKB



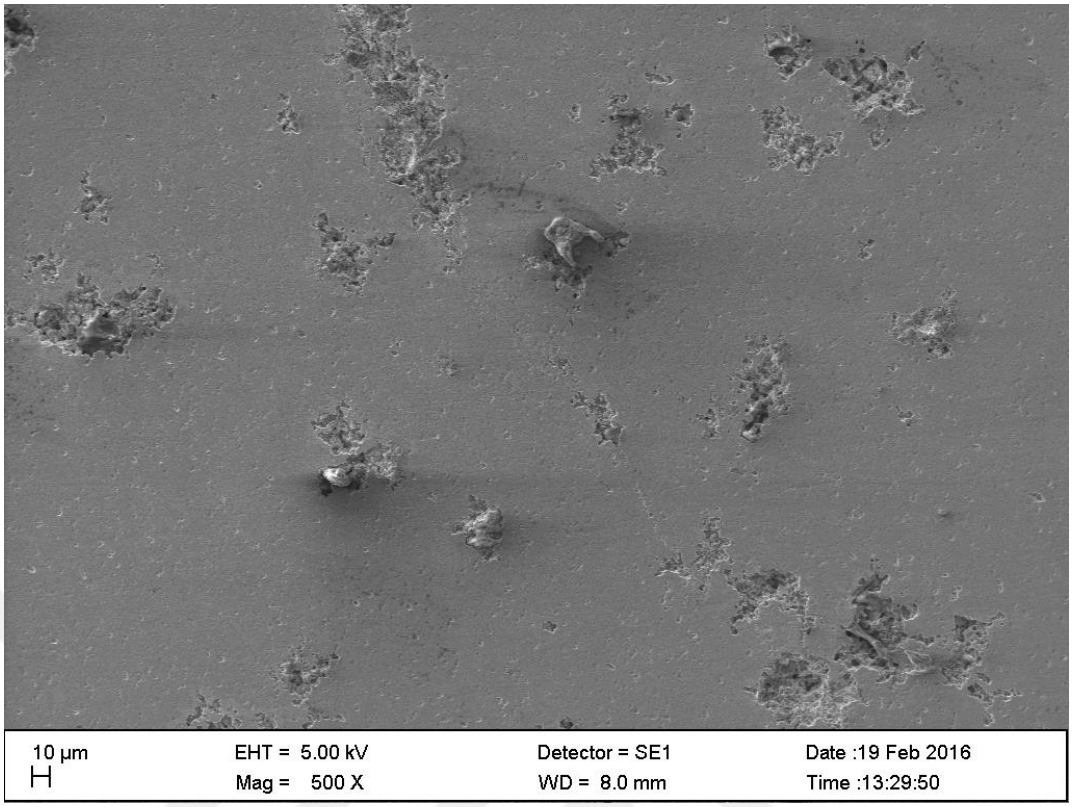
Şekil 4.93. 550 dev/dak – 40 mm/dak (x2500) – TMEB



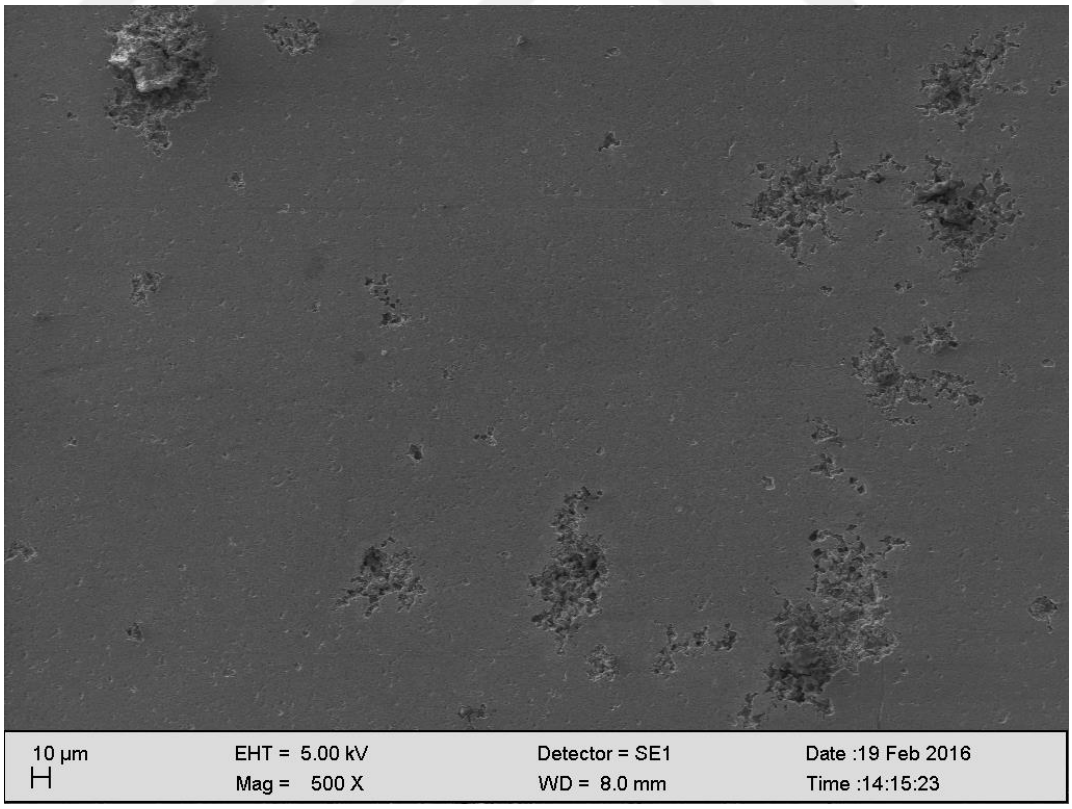
Şekil 4.94. 550 dev/dak – 40 mm/dak (x2500) – IEB



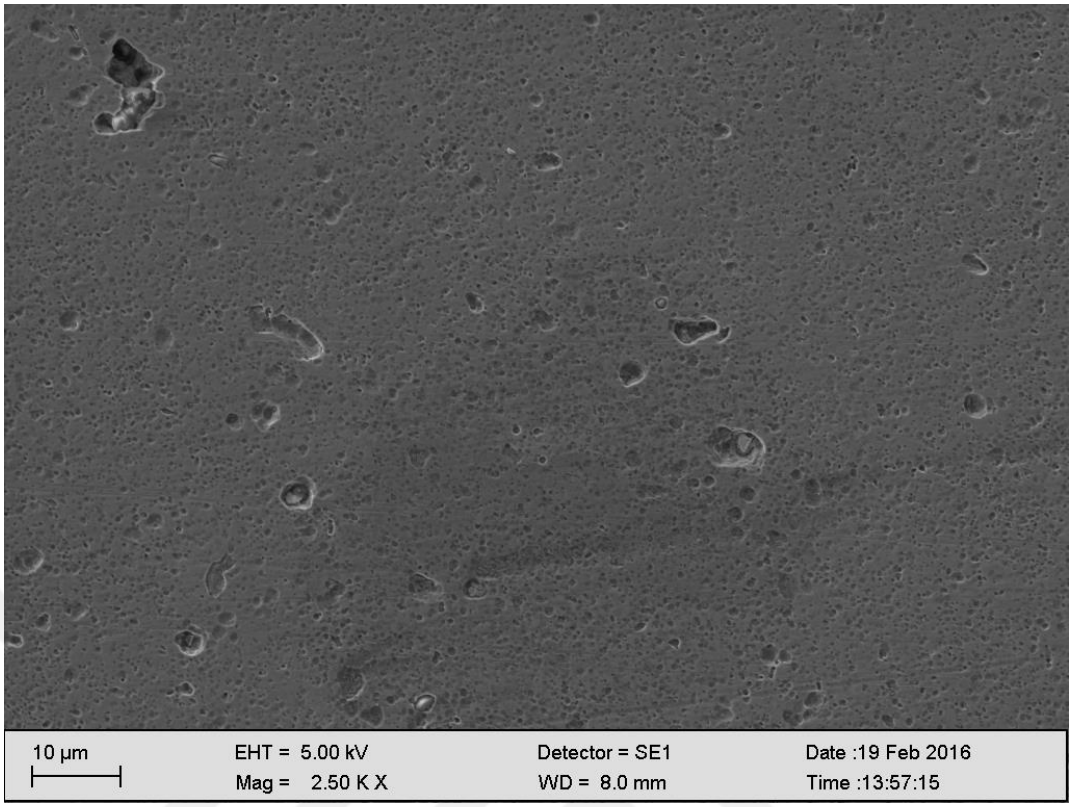
Şekil 4.95. 700 dev/dak – 40 mm/dak (x500) – DYKB



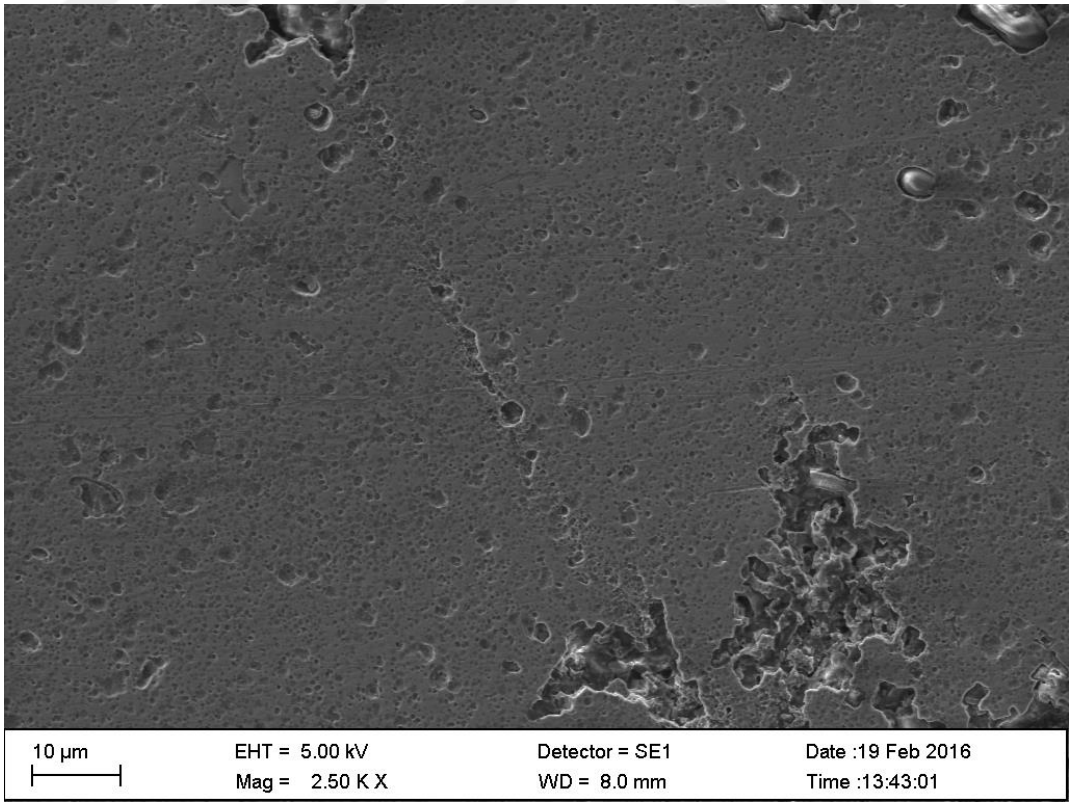
Şekil 4.96. 700 dev/dak – 40 mm/dak (x500) – TMEB



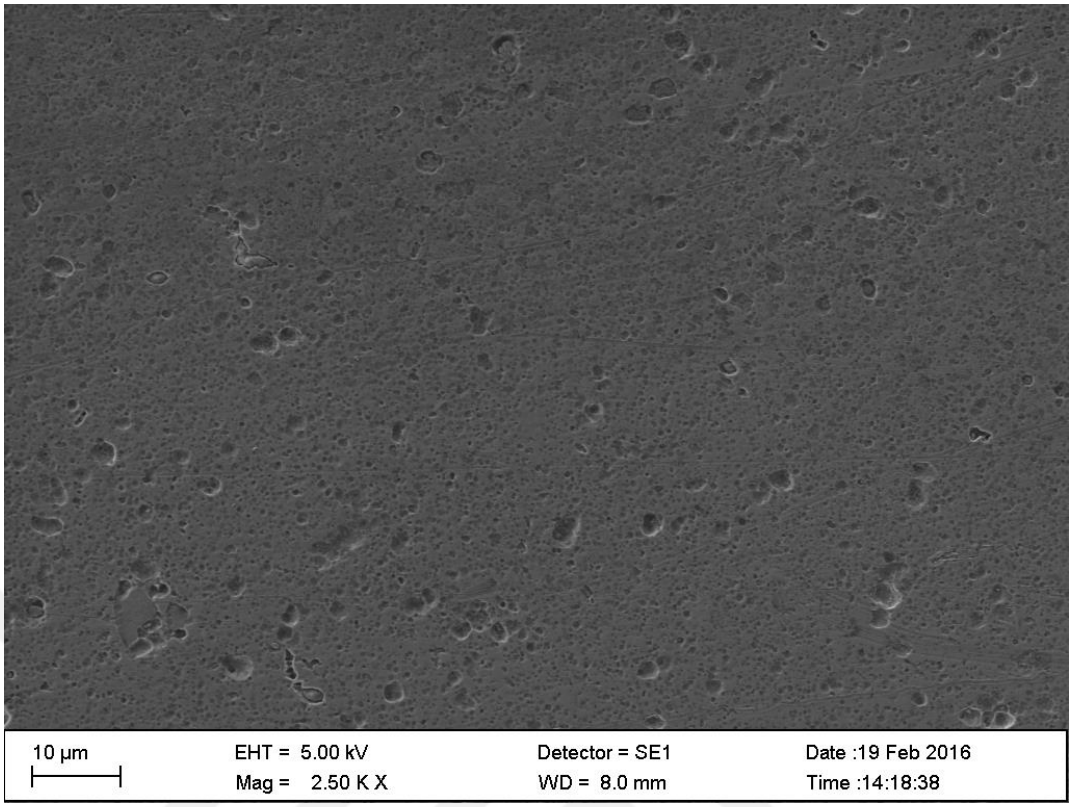
Şekil 4.97. 700 dev/dak – 40 mm/dak (x500) – IEB



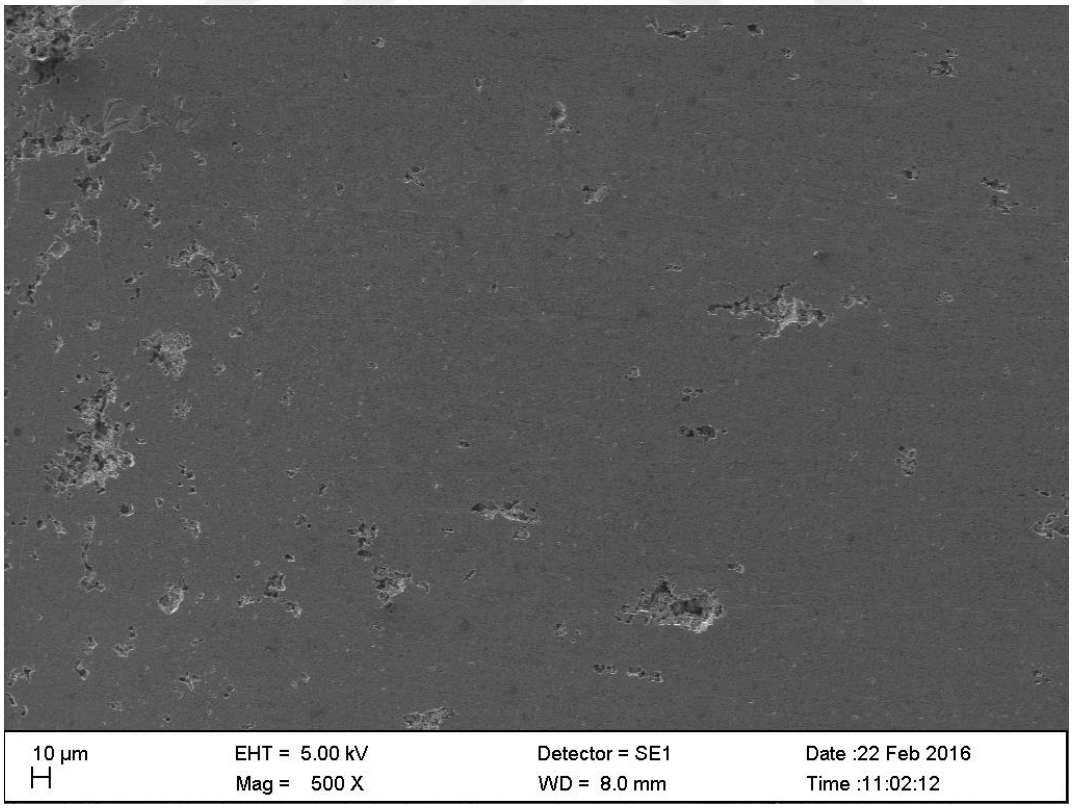
Şekil 4.98. 700 dev/dak – 40 mm/dak (x2500) – DYKB



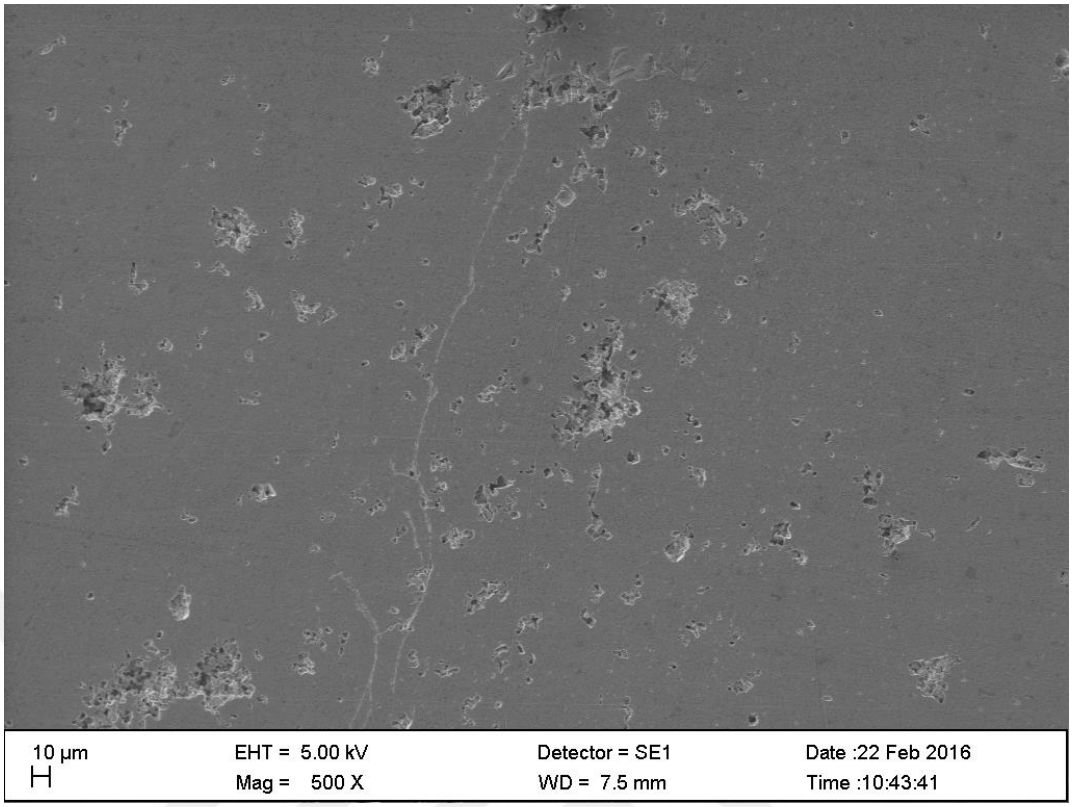
Şekil 4.99. 700 dev/dak – 40 mm/dak (x2500) – TMEB



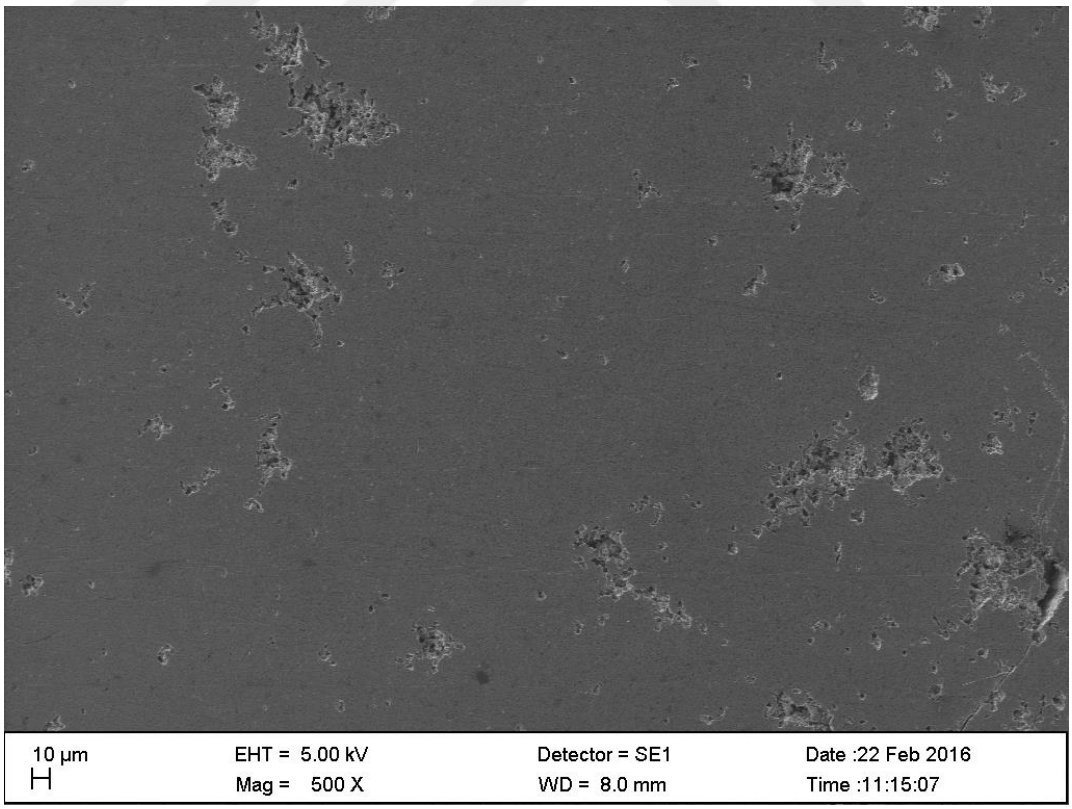
Şekil 4.100. 700 dev/dak – 40 mm/dak (x2500) – IEB



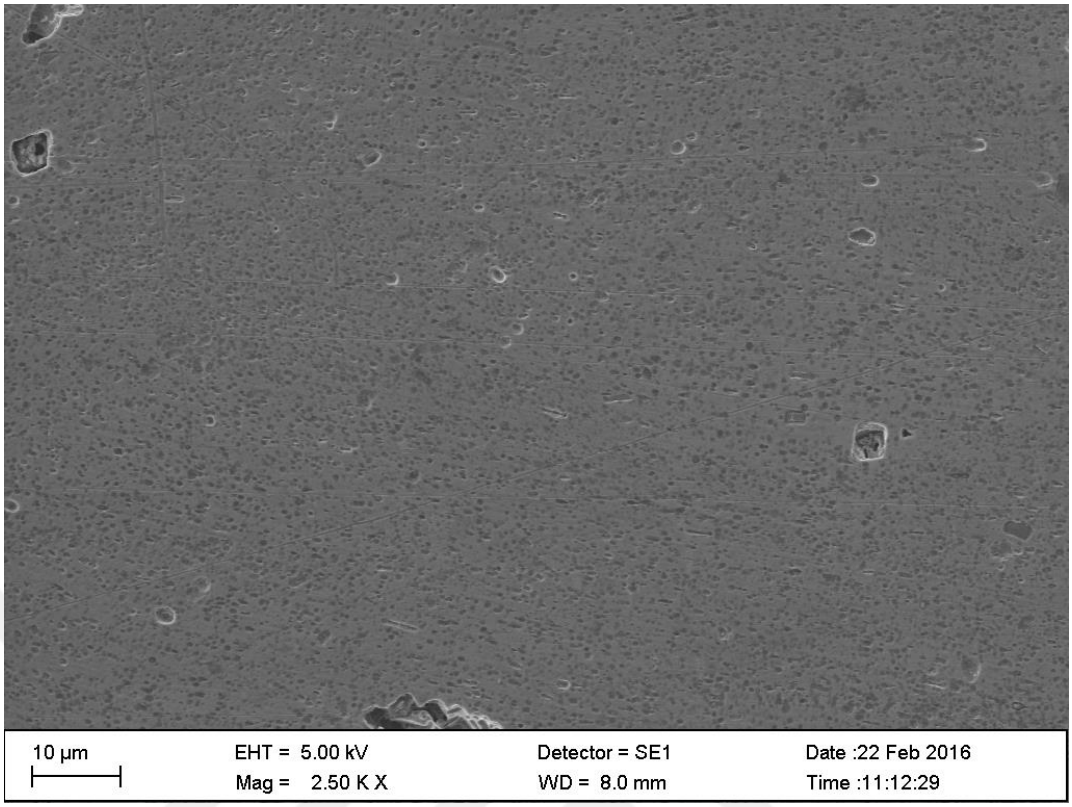
Şekil 4.101. 800 dev/dak – 40 mm/dak (x500) – DYKB



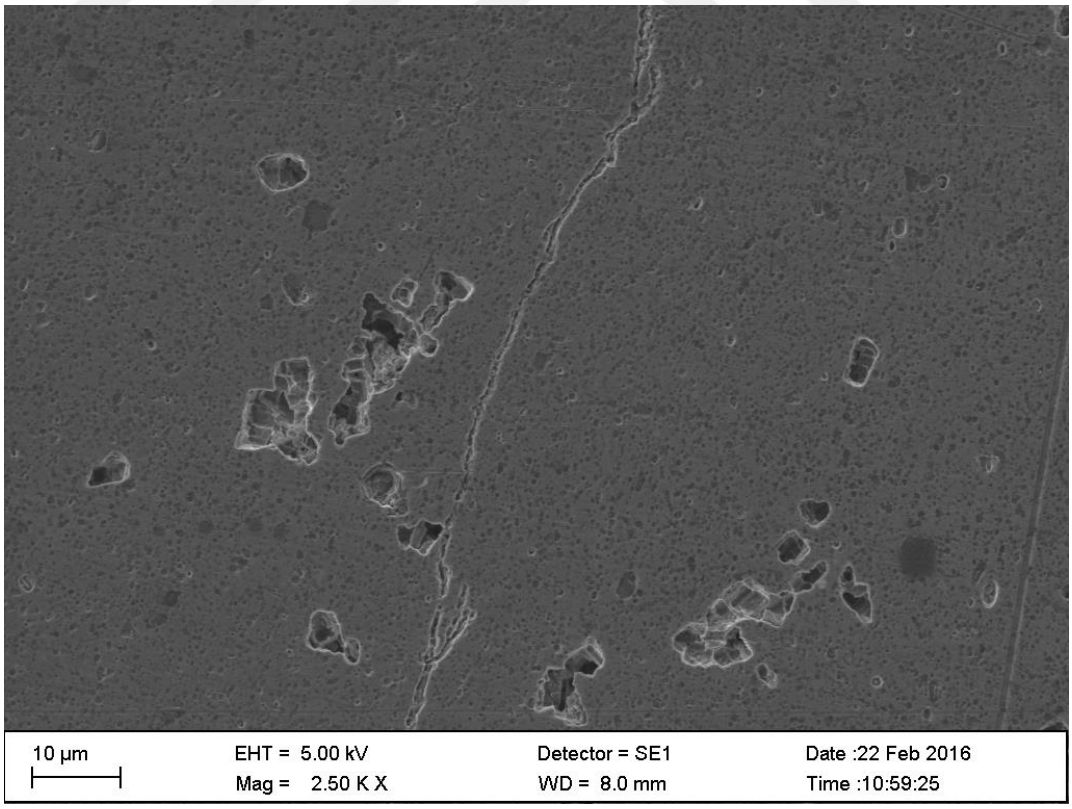
Şekil 4.102. 800 dev/dak – 40 mm/dak (x500) – TMEB



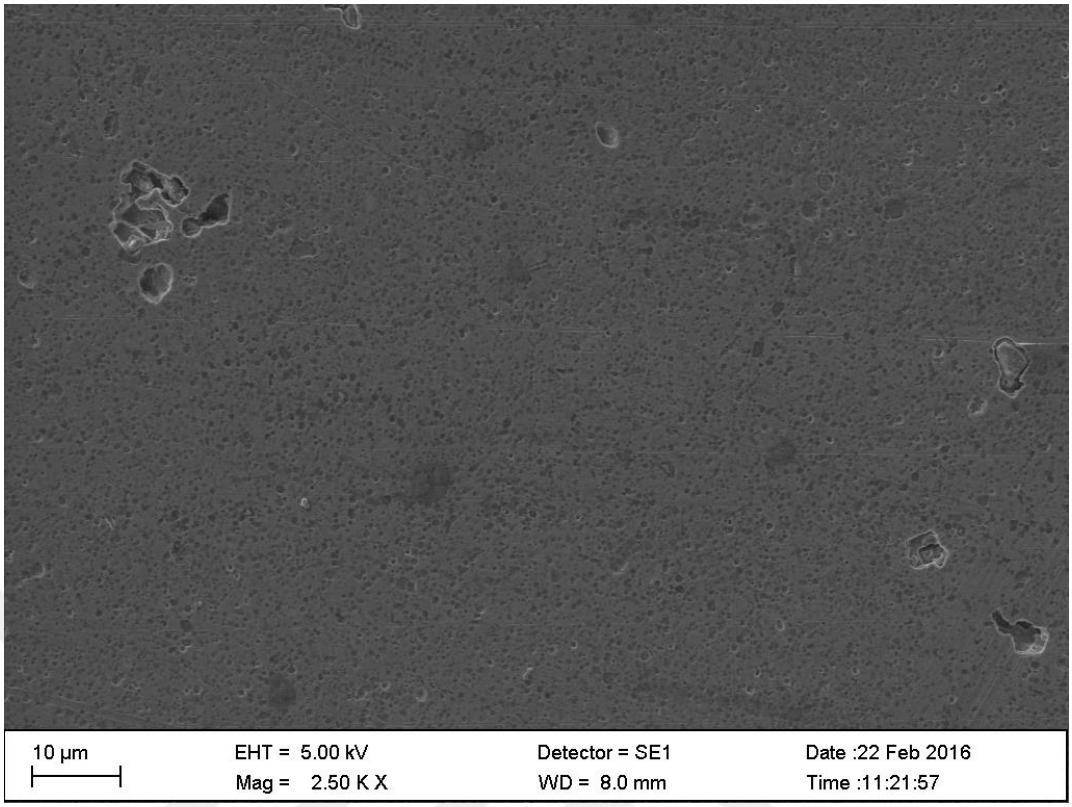
Şekil 4.103. 800 dev/dak – 40 mm/dak (x500) – IEB



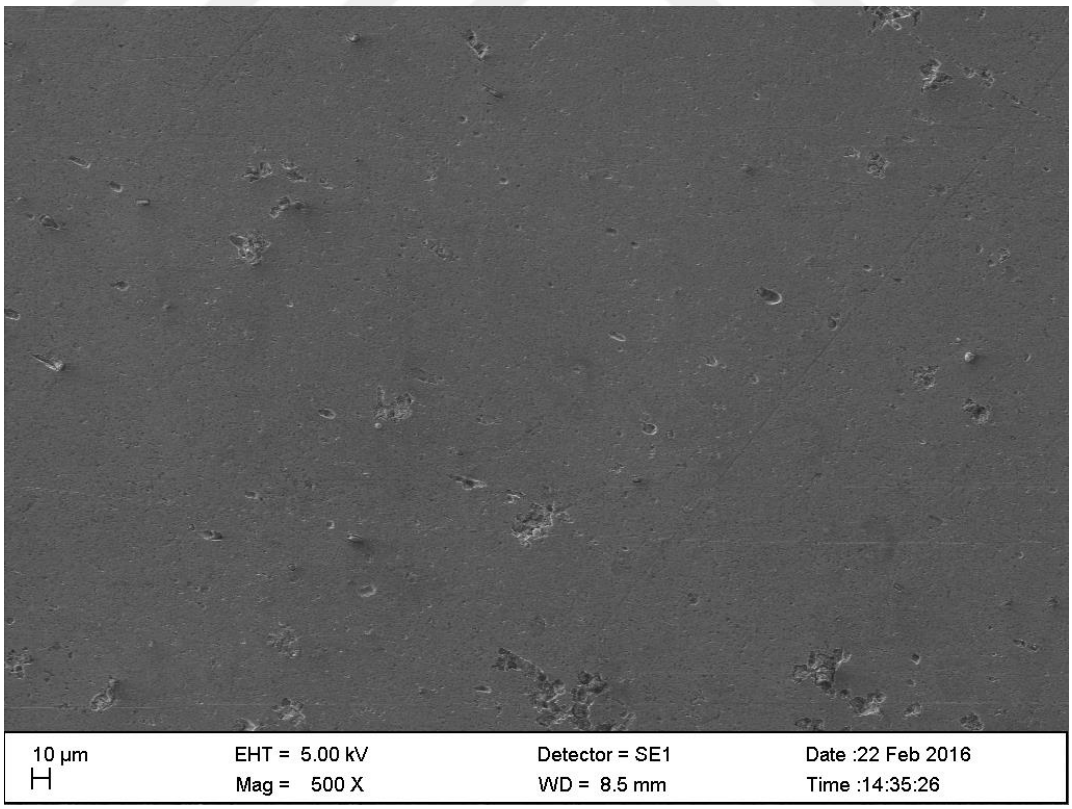
Şekil 4.104. 800 dev/dak – 40 mm/dak (x2500) – DYKB



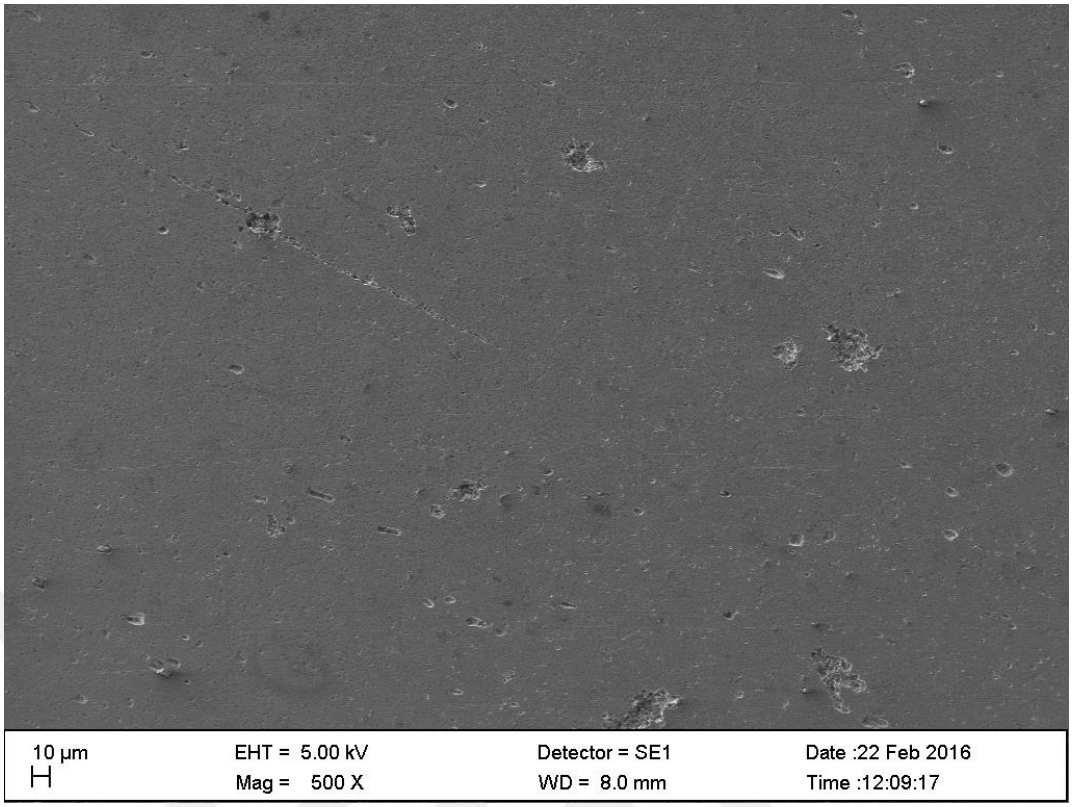
Şekil 4.105. 800 dev/dak – 40 mm/dak (x2500) – TMEB



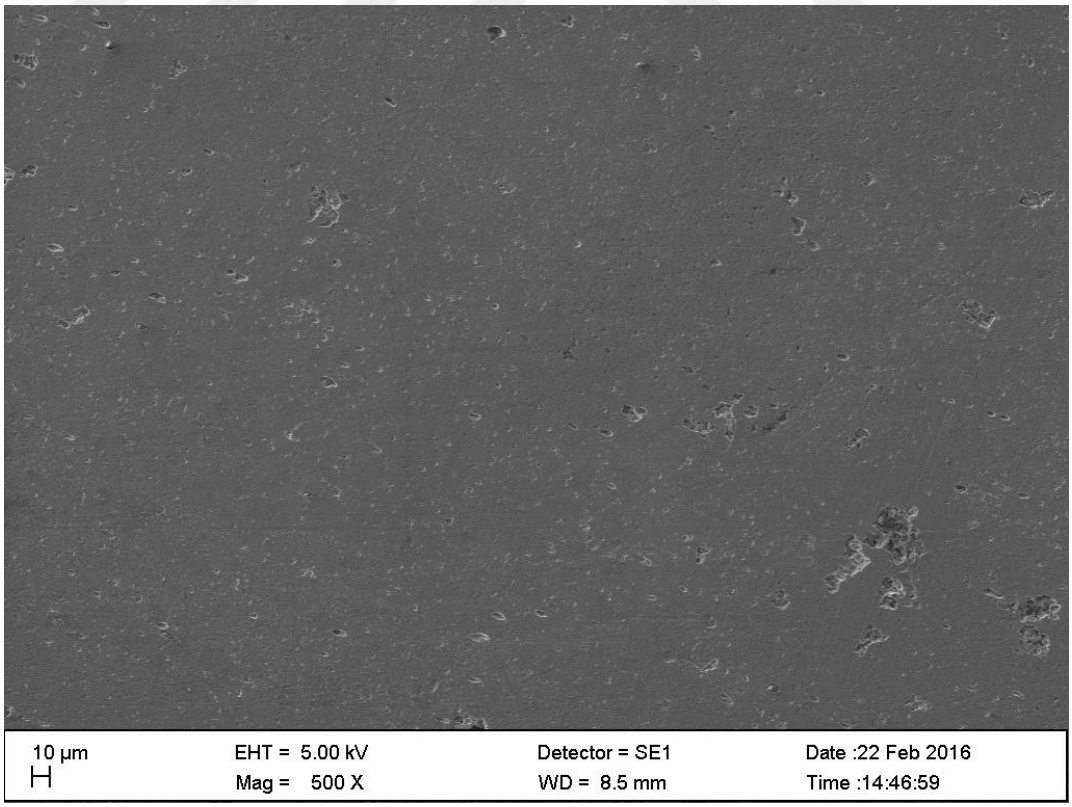
Şekil 4.106. 800 dev/dak – 40 mm/dak (x2500) – IEB



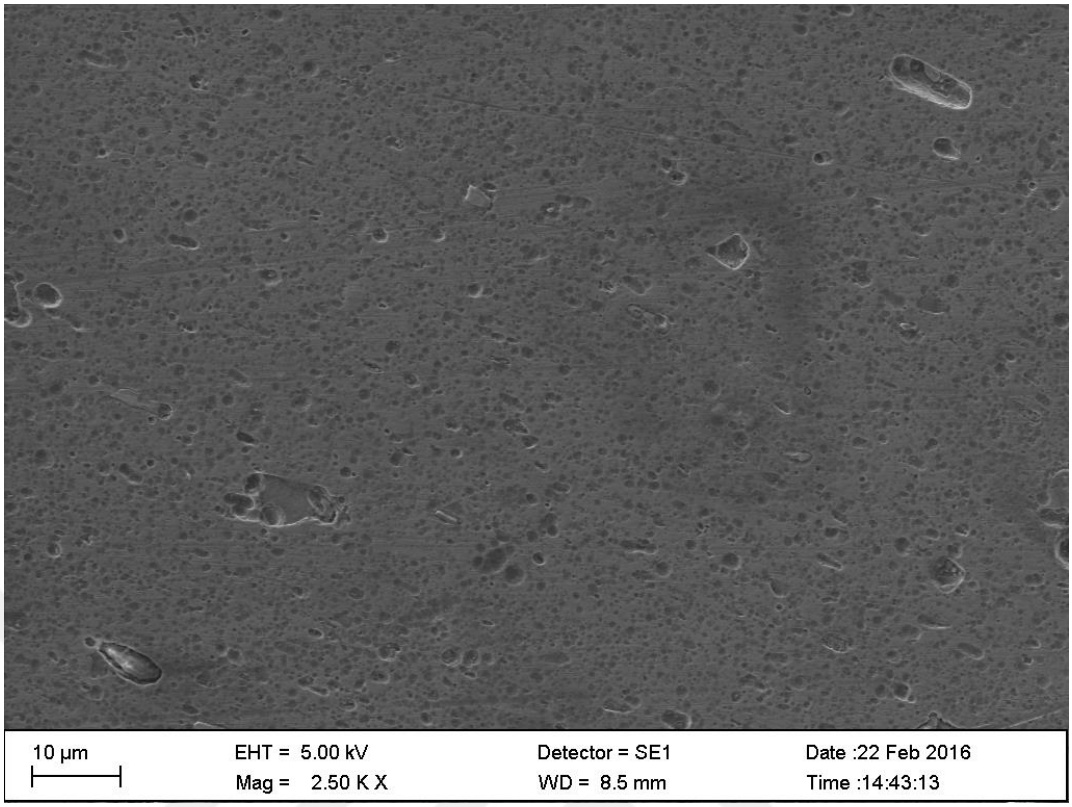
Şekil 4.107. 1400 dev/dak – 40 mm/dak (x500) – DYKB



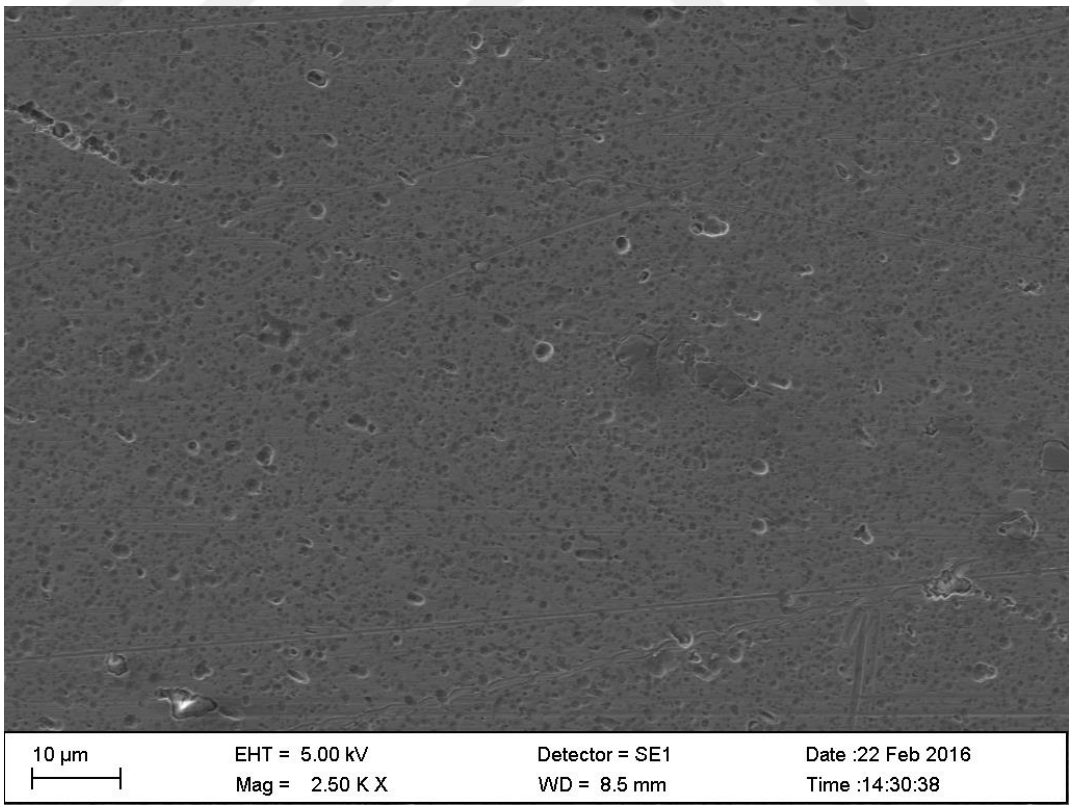
Şekil 4.108. 1400 dev/dak – 40 mm/dak (x500) – TMEB



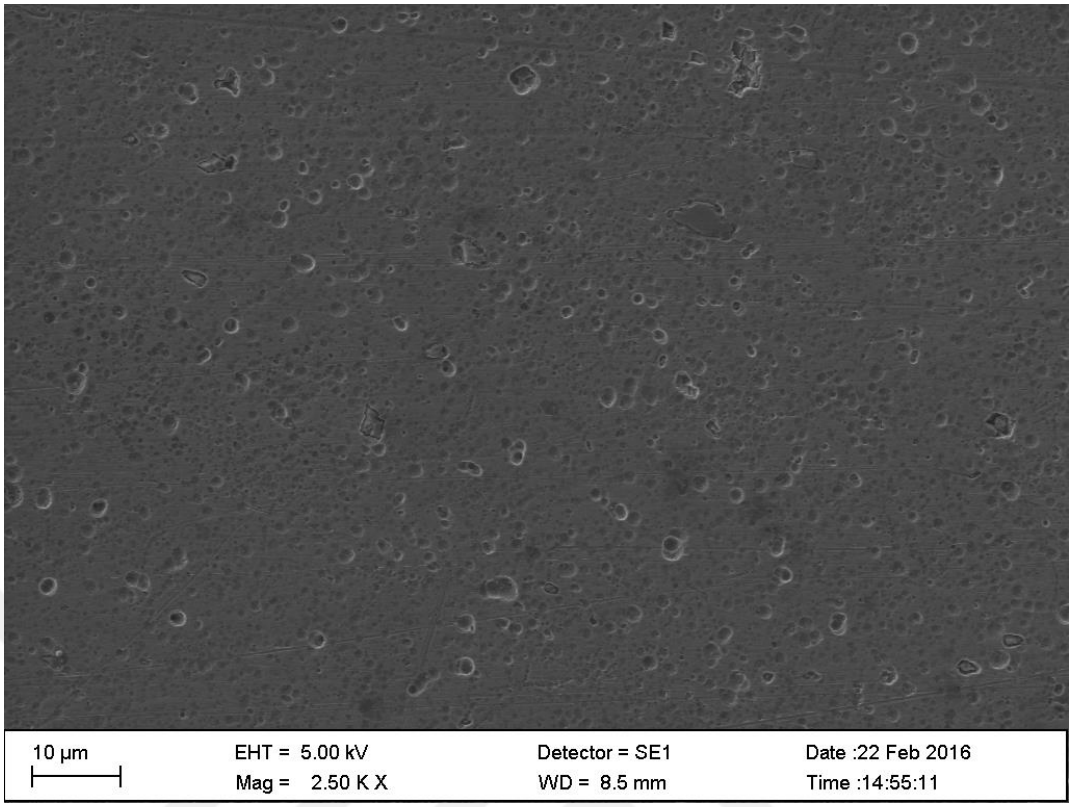
Şekil 4.109. 1400 dev/dak – 40 mm/dak (x500) – IEB



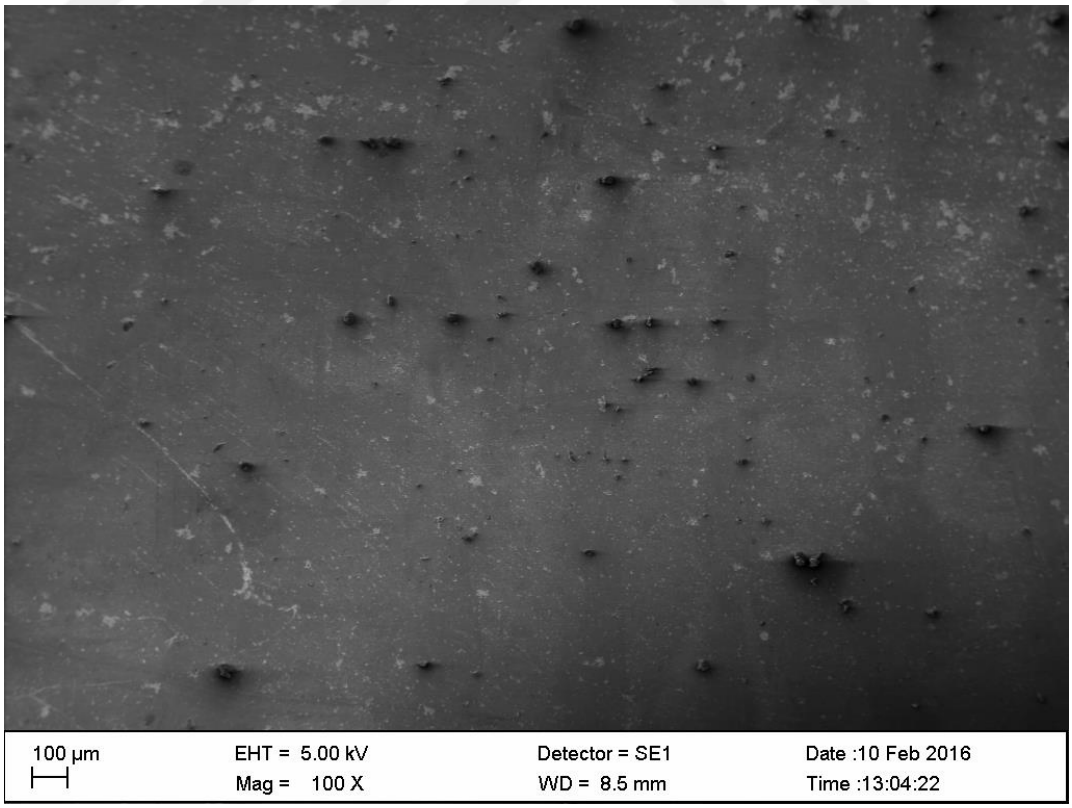
Şekil 4.110. 800 dev/dak – 40 mm/dak (x2500) – DYKB



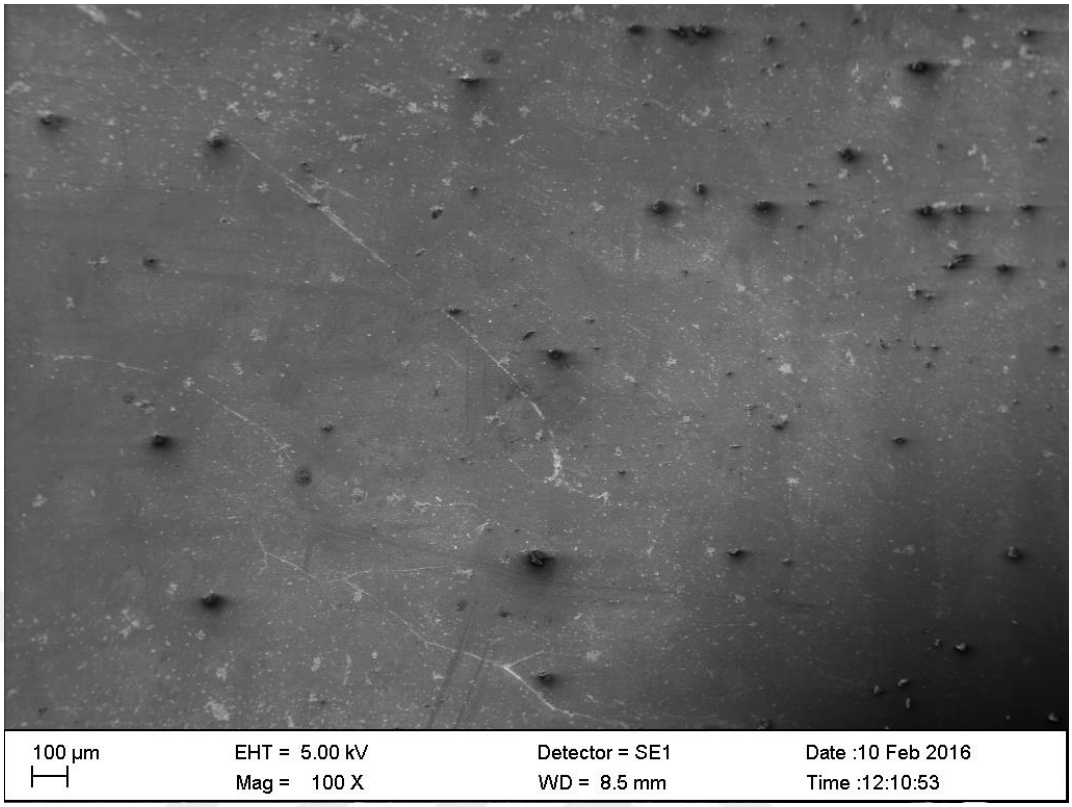
Şekil 4.111. 800 dev/dak – 40 mm/dak (x2500) – TMEB



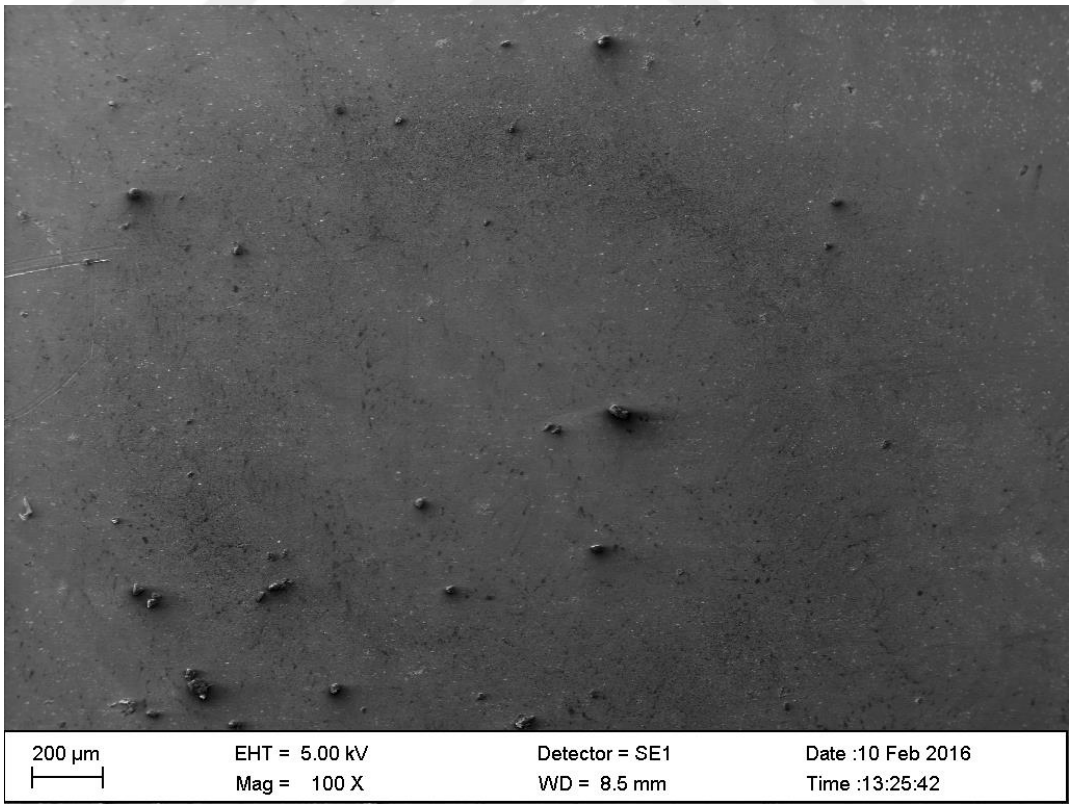
Şekil 4.112. 800 dev/dak – 40 mm/dak (x2500) – IEB



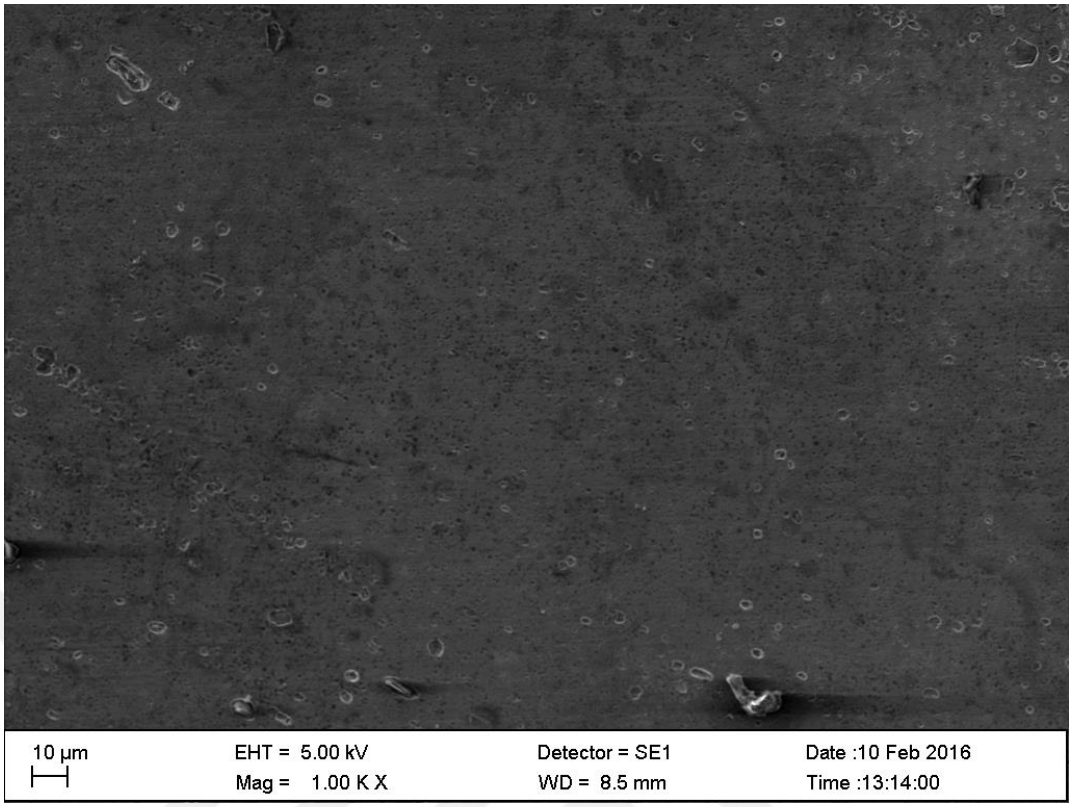
Şekil 4.113. 550 dev/dak – 80 mm/dak (x500) – DYKB



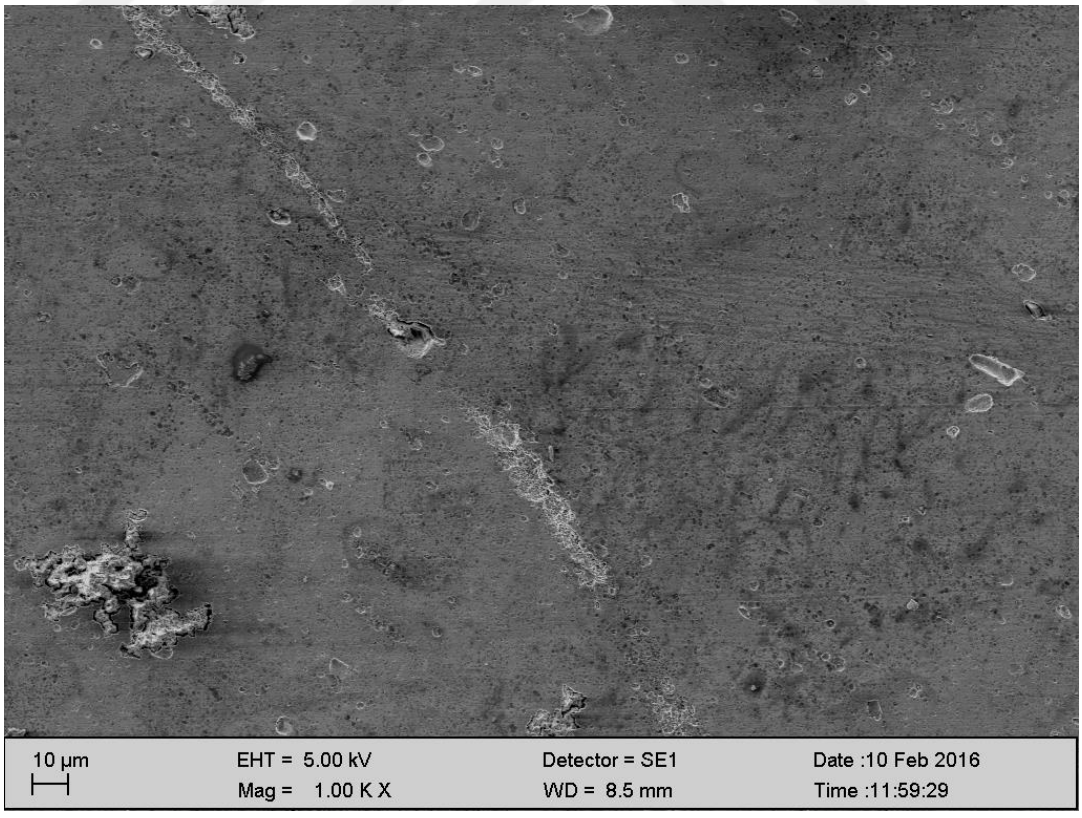
Şekil 4.114. 550 dev/dak – 80 mm/dak (x500) – TMEB



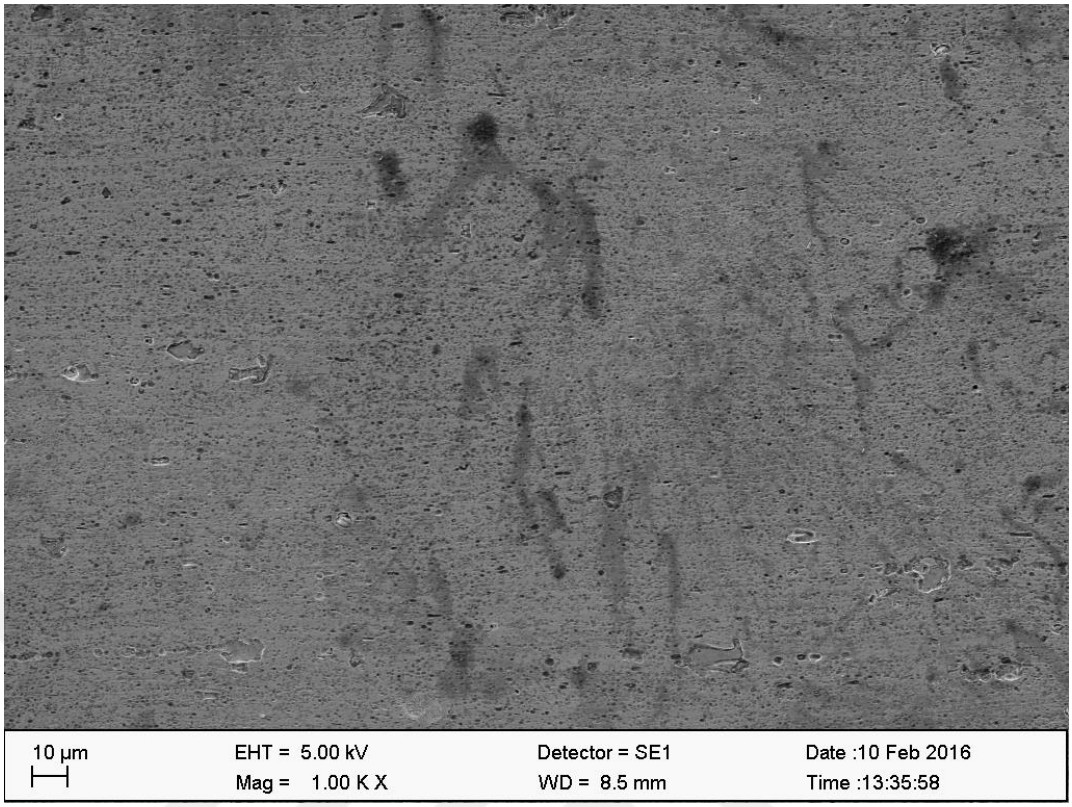
Şekil 4.115. 550 dev/dak – 80 mm/dak (x500) – IEB



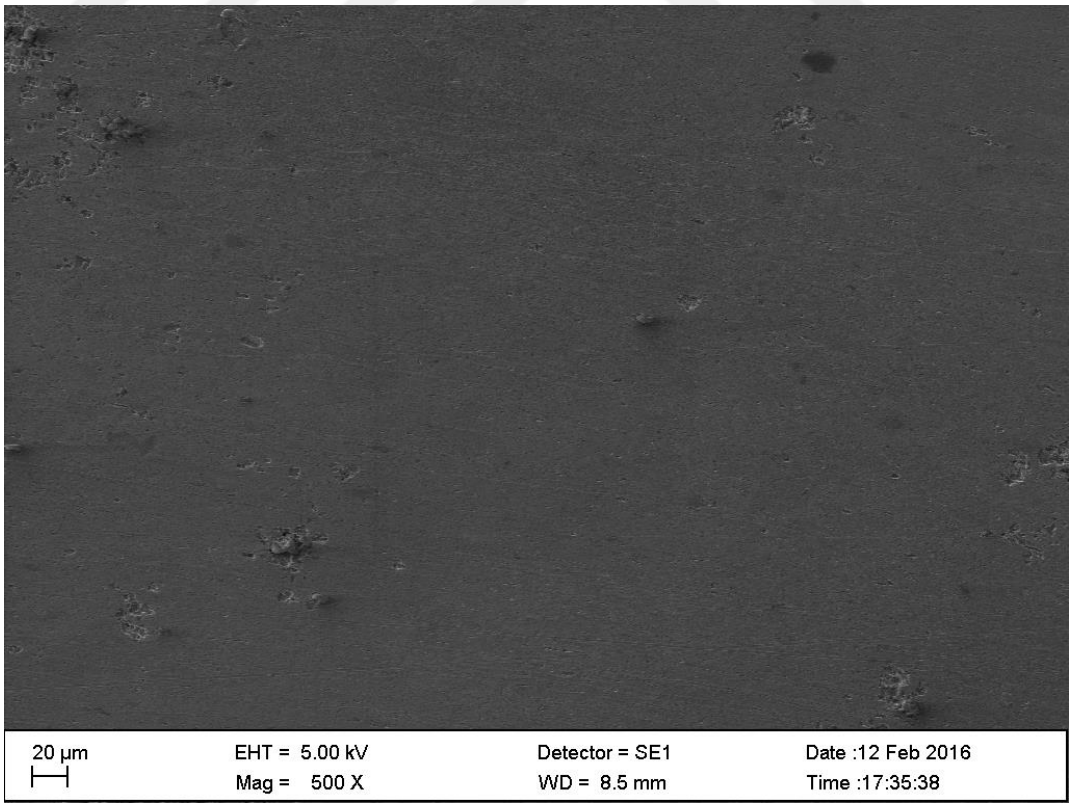
Şekil 4.116. 550 dev/dak – 80 mm/dak (x2500) – DYKB



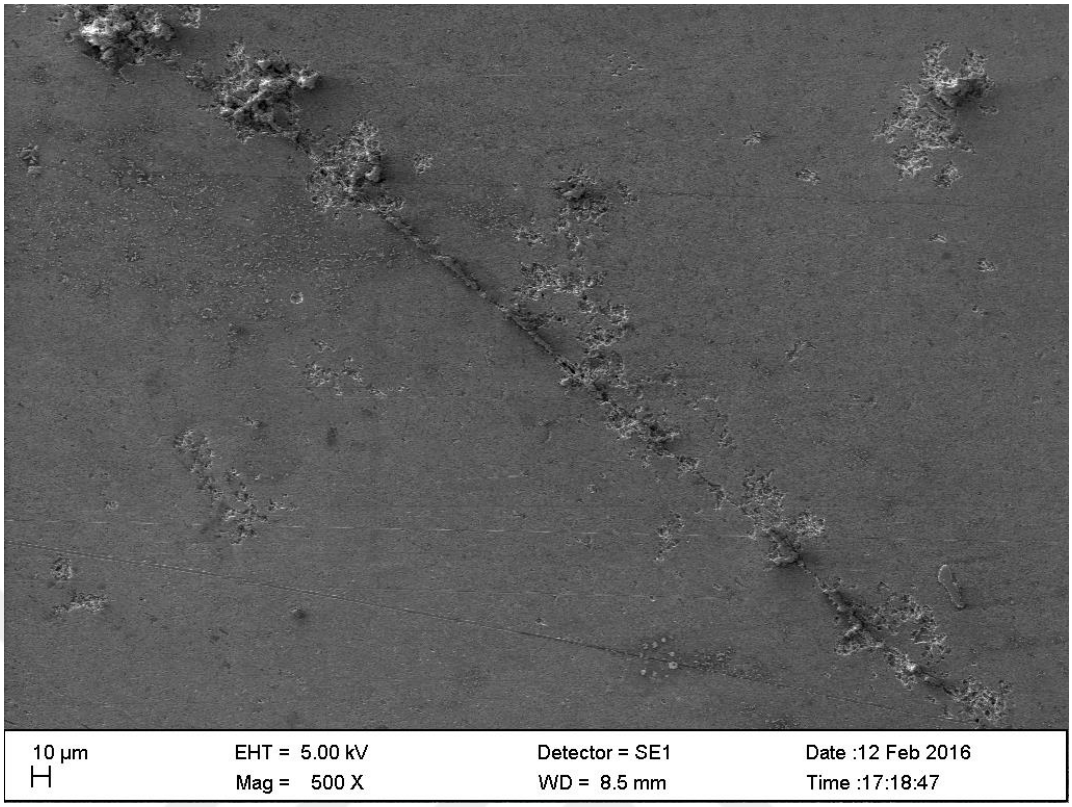
Şekil 4.117. 550 dev/dak – 80 mm/dak (x2500) – TMEB



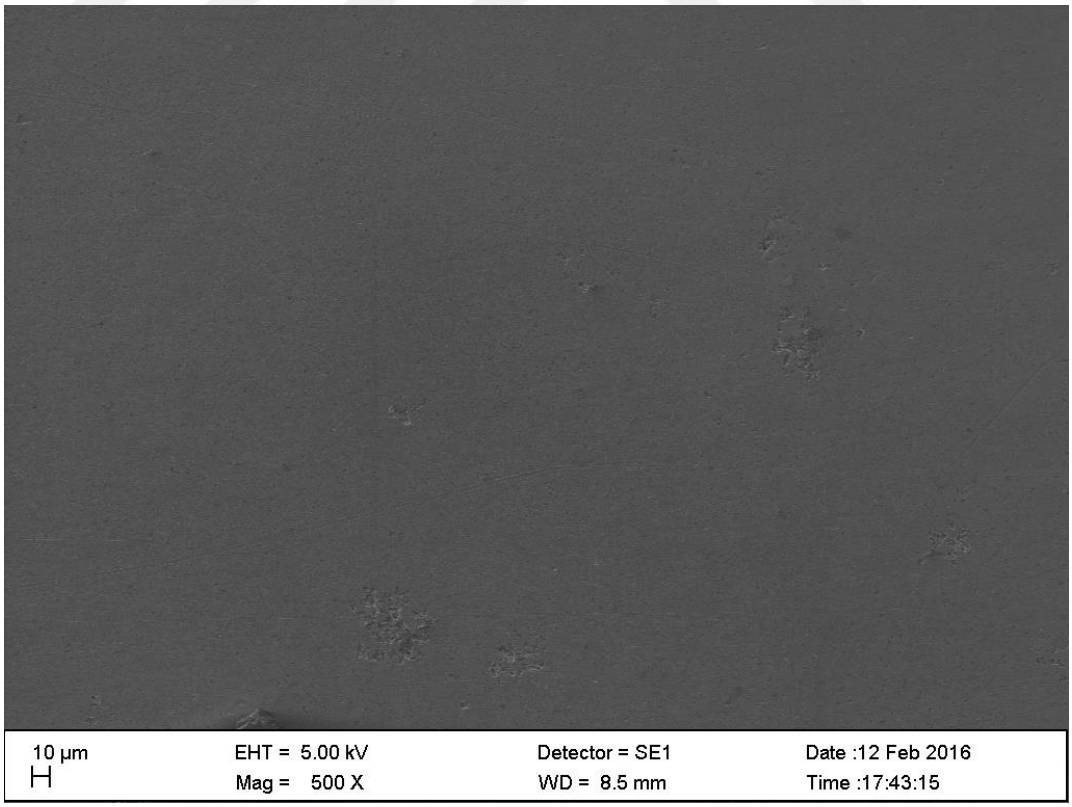
Şekil 4.118. 550 dev/dak – 80 mm/dak (x2500) – IEB



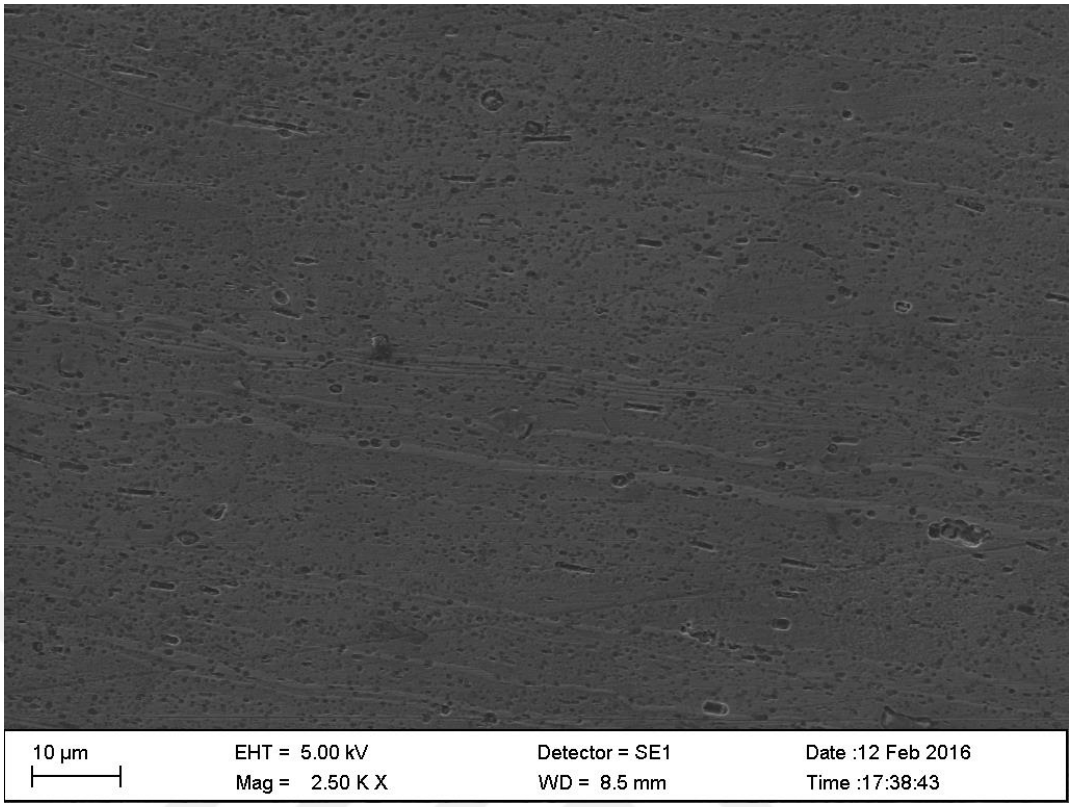
Şekil 4.119. 700 dev/dak – 80 mm/dak (x500) – DYKB



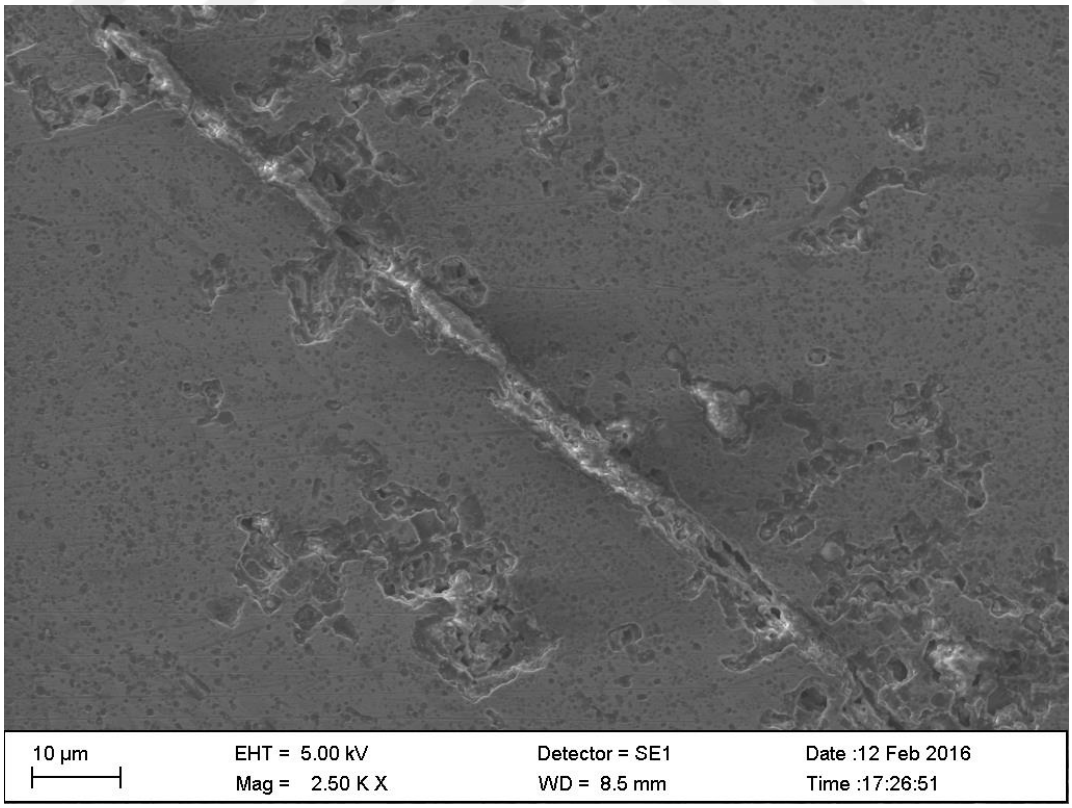
Şekil 4.120. 700 dev/dak – 80 mm/dak (x500) – TMEB



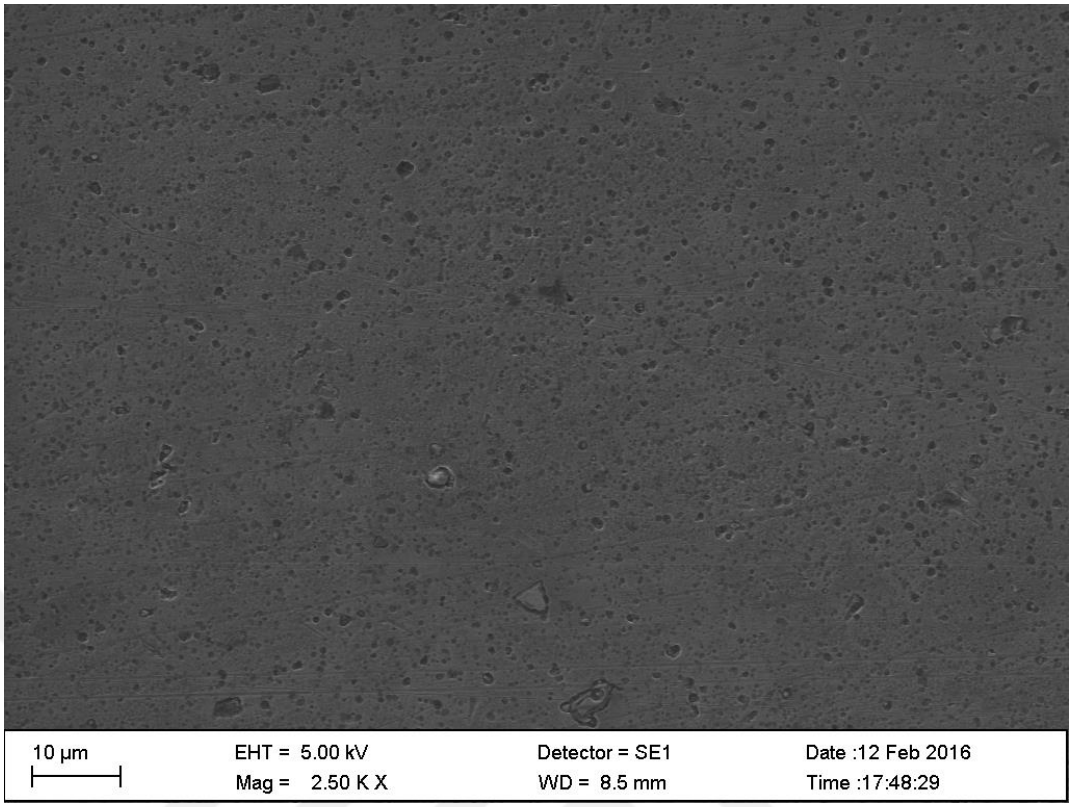
Şekil 4.121. 700 dev/dak – 80 mm/dak (x500) – IEB



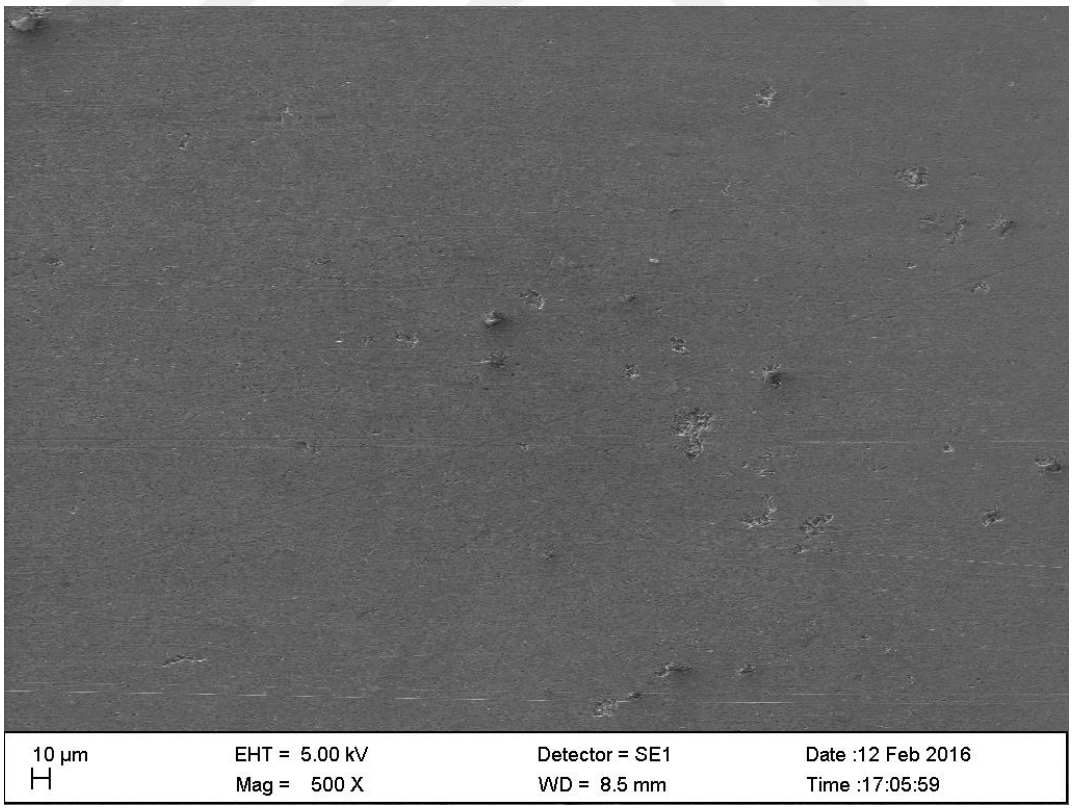
Şekil 4.122. 700 dev/dak – 80 mm/dak (x2500) – DYKB



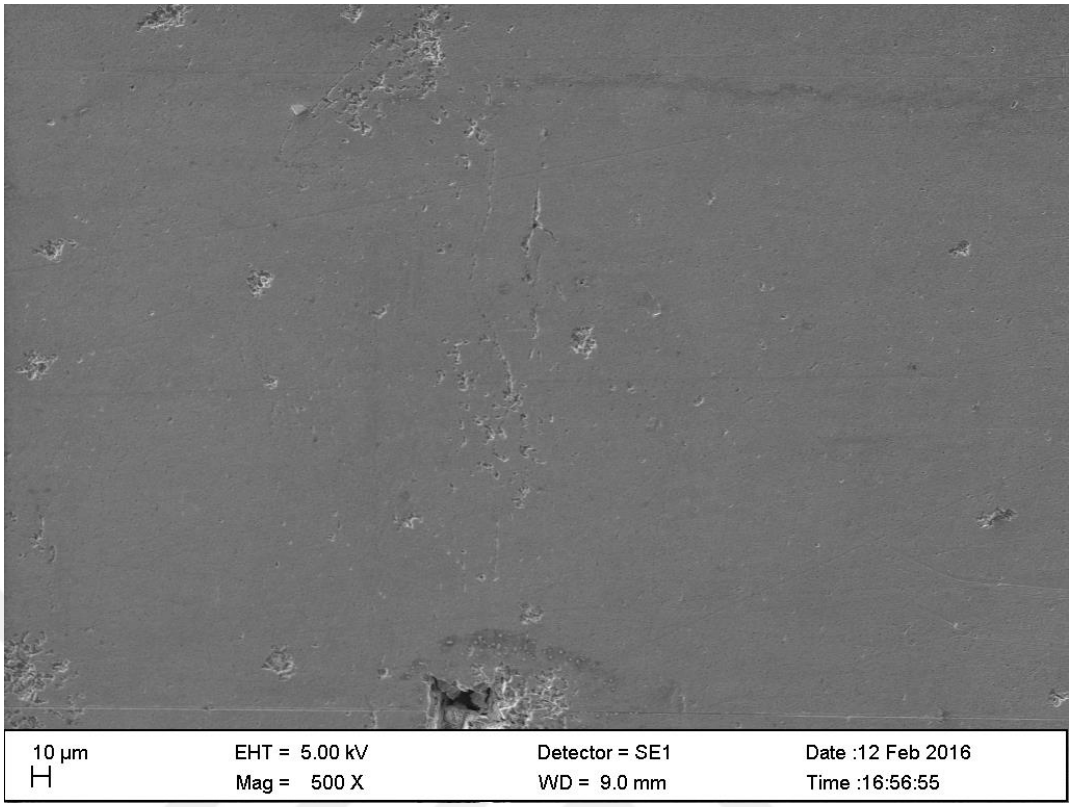
Şekil 4.123. 700 dev/dak – 80 mm/dak (x2500) – TMEB



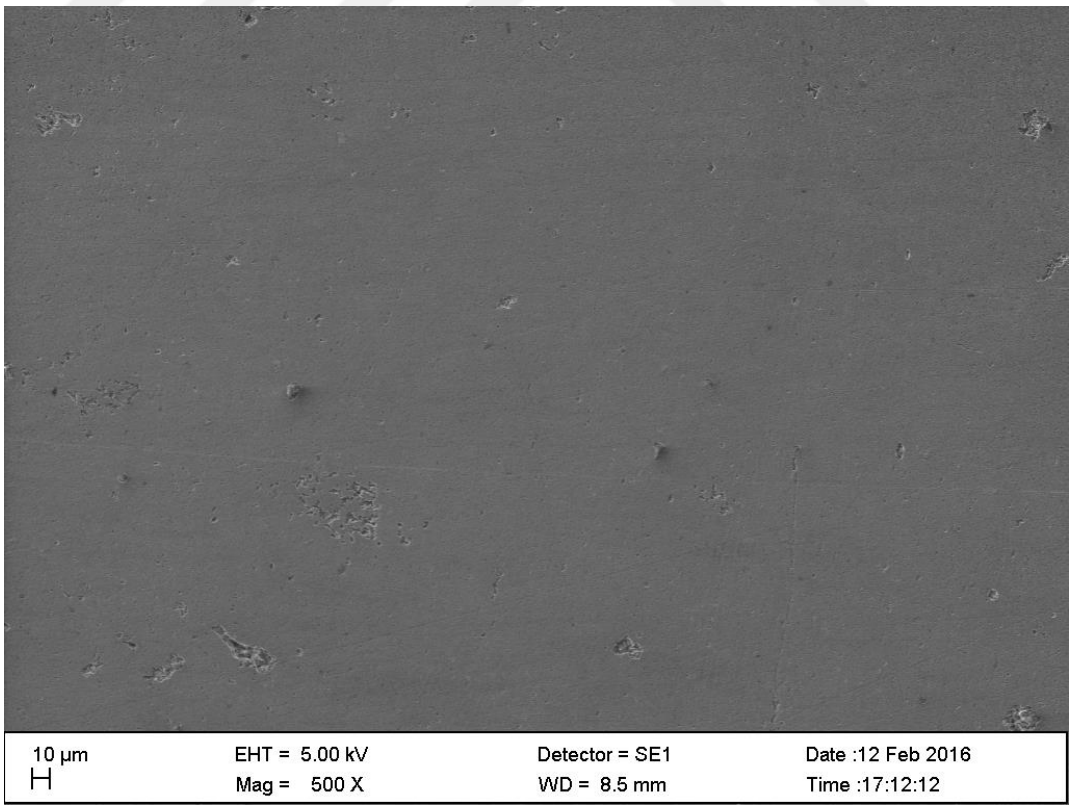
Şekil 4.124. 700 dev/dak – 80 mm/dak (x2500) – IEB



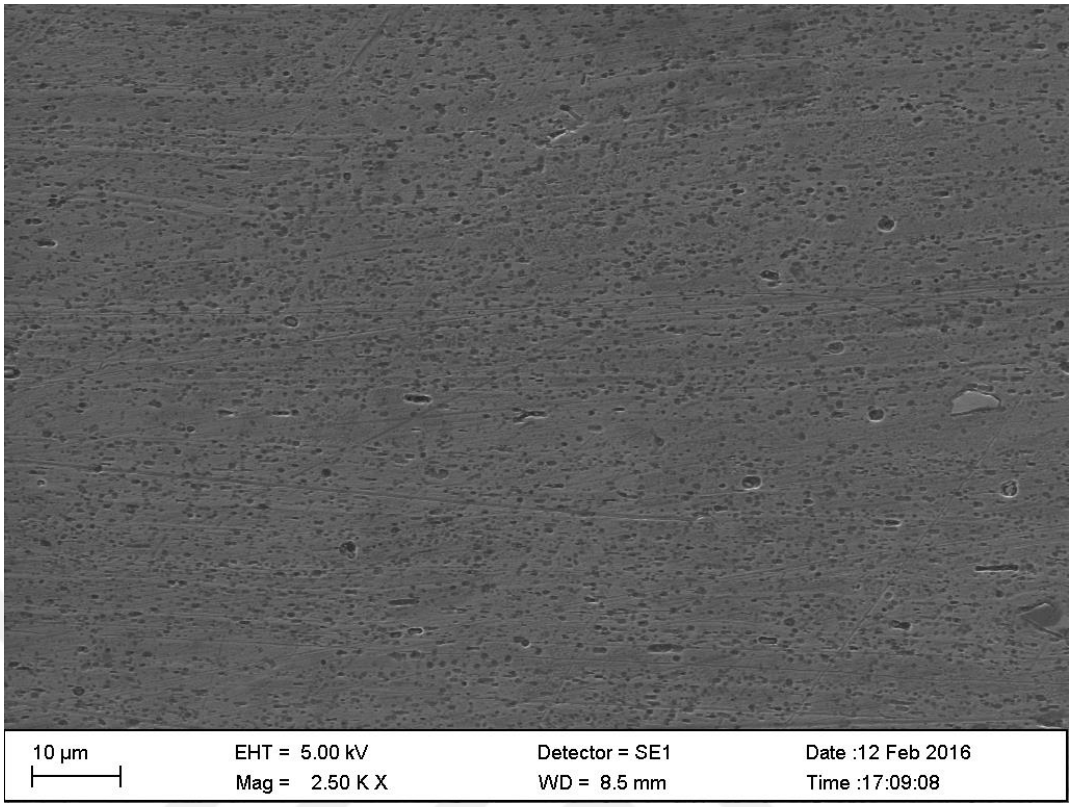
Şekil 4.125. 800 dev/dak – 80 mm/dak (x500) – DYKB



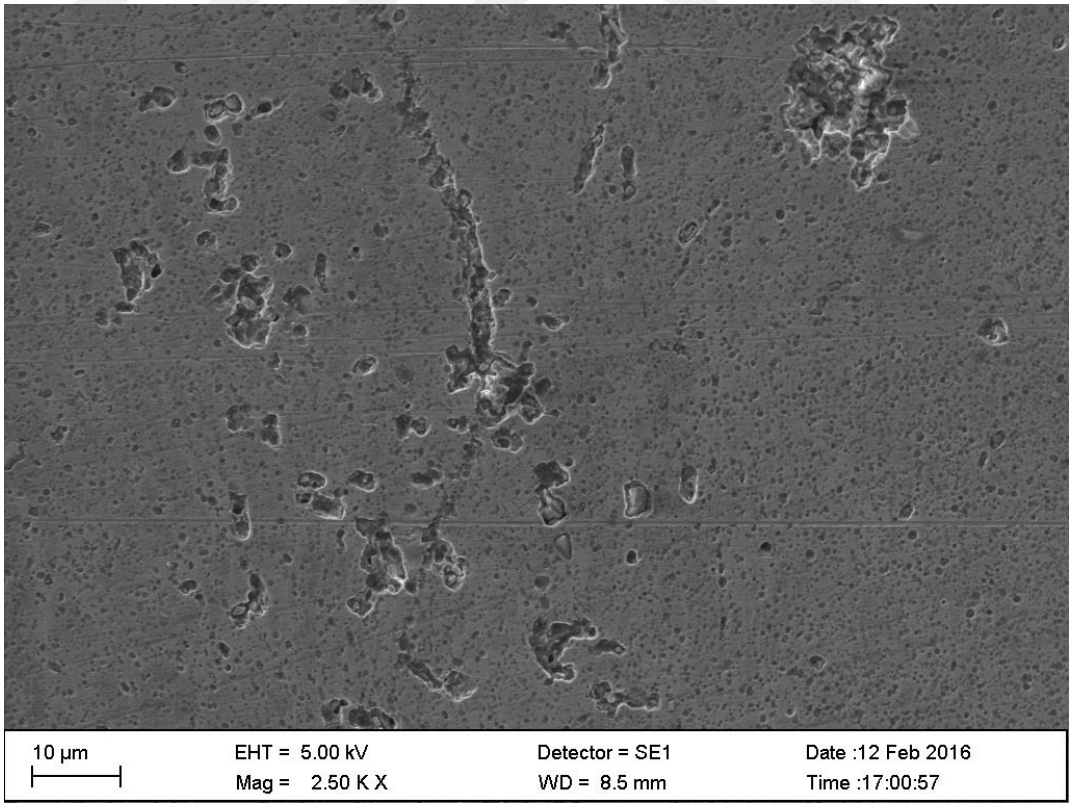
Şekil 4.126. 800 dev/dak – 80 mm/dak (x500) – TMEB



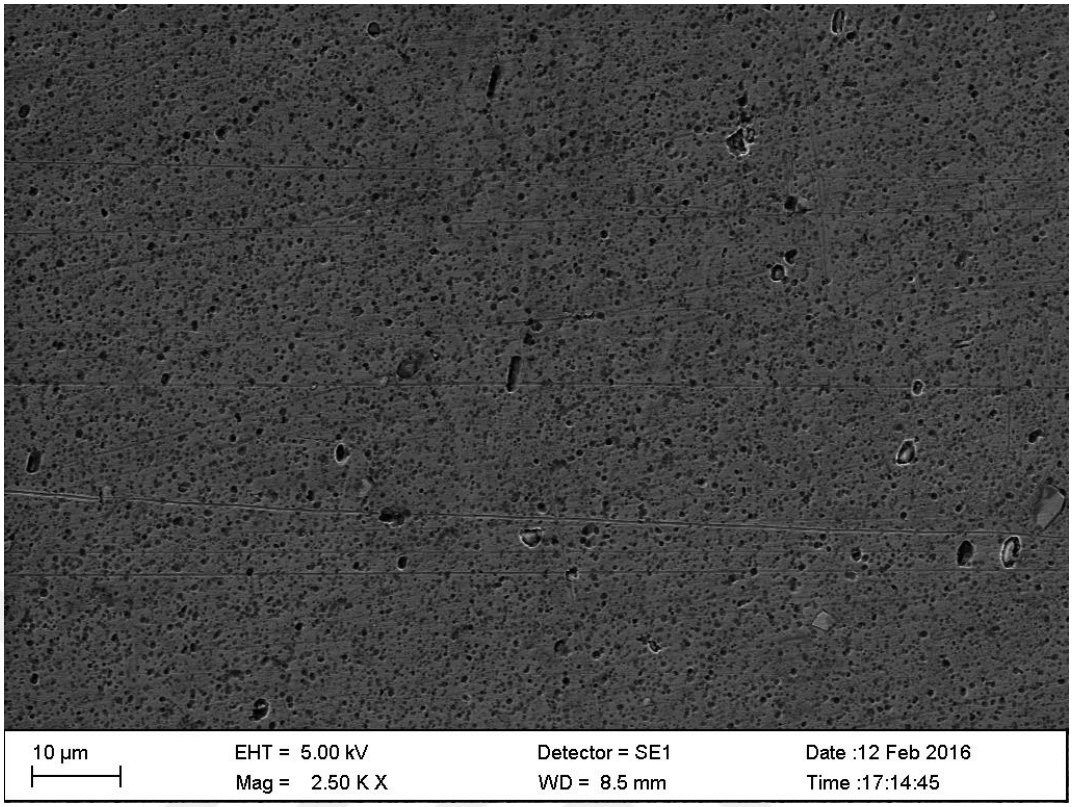
Şekil 4.127. 800 dev/dak – 80 mm/dak (x500) – IEB



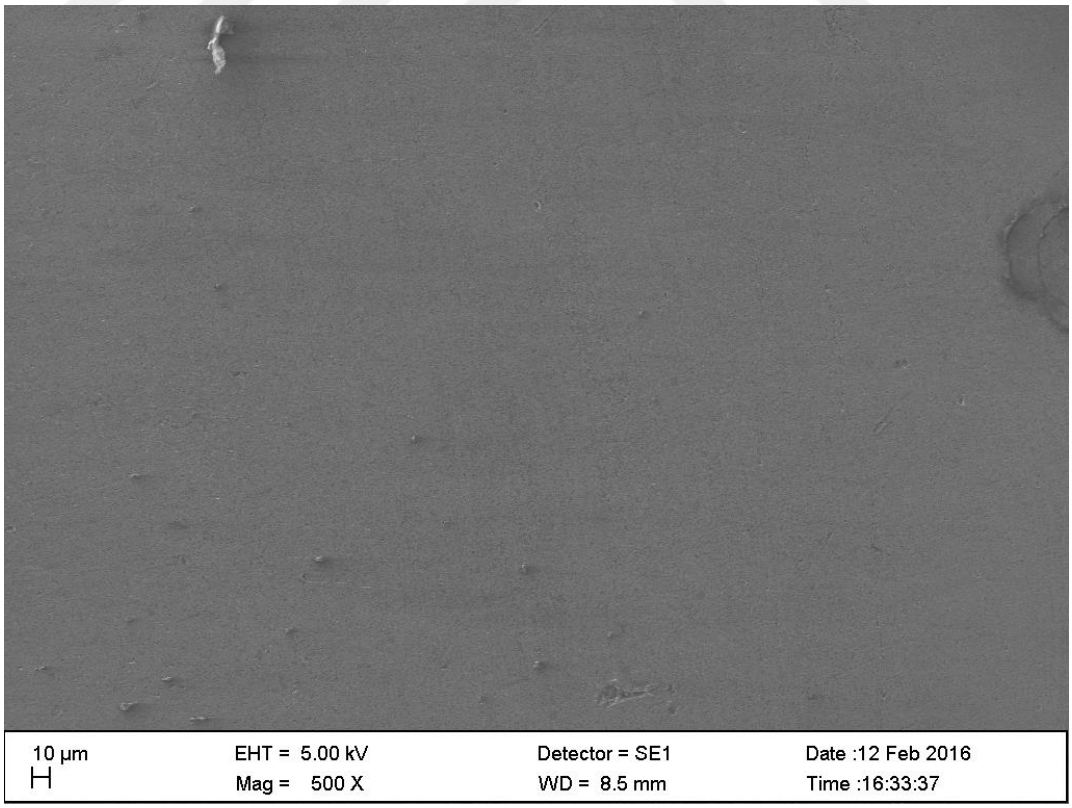
Şekil 4.128. 800 dev/dak – 80 mm/dak (x2500) – DYKB



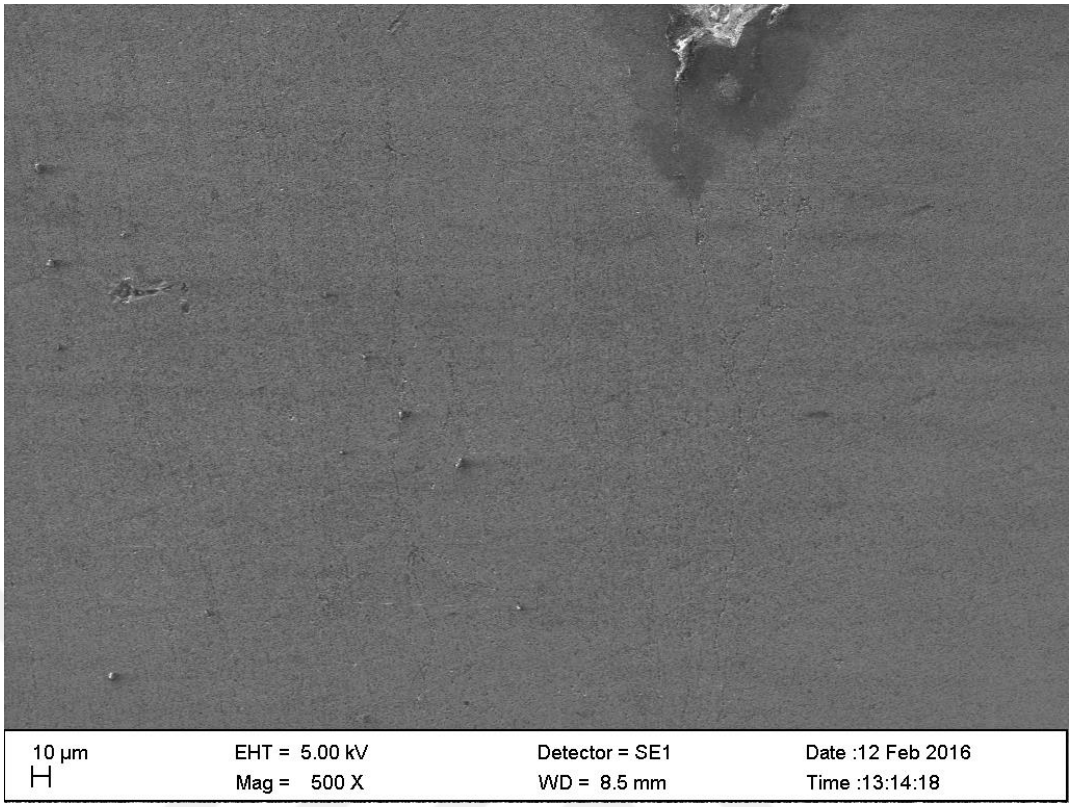
Şekil 4.129. 800 dev/dak – 80 mm/dak (x2500) – TMEB



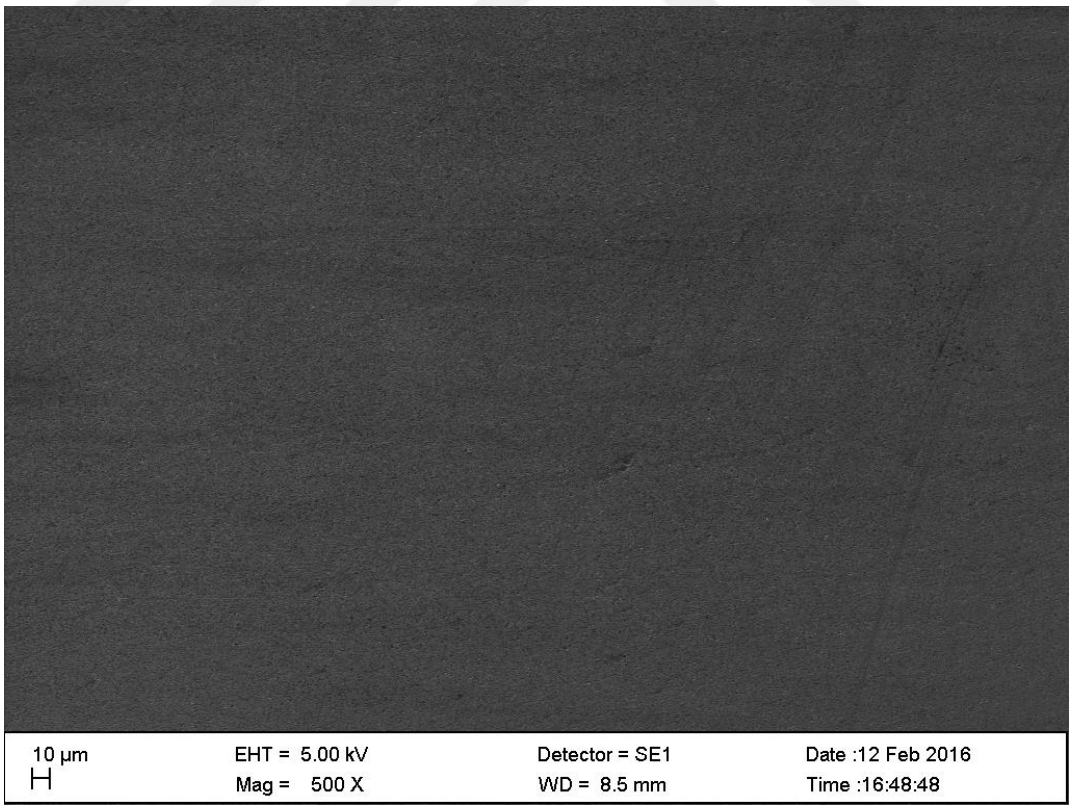
Şekil 4.130. 800 dev/dak – 80 mm/dak (x2500) – IEB



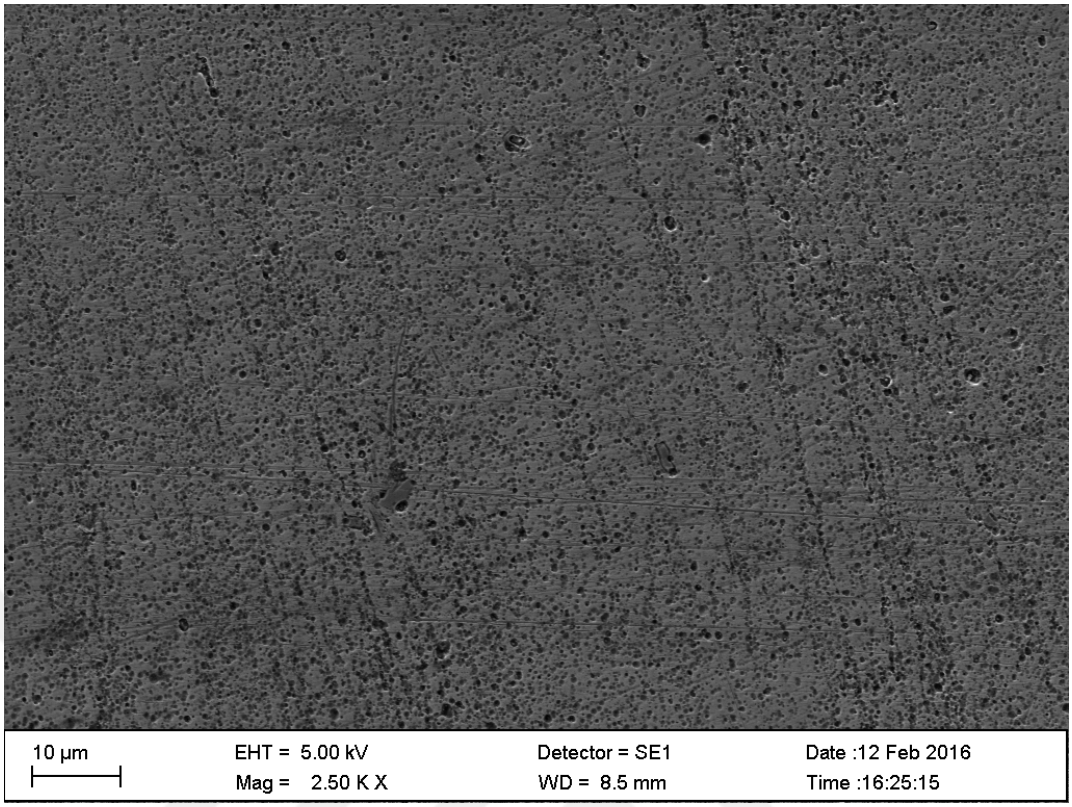
Şekil 4.131. 1400 dev/dak – 80 mm/dak (x500) – DYKB



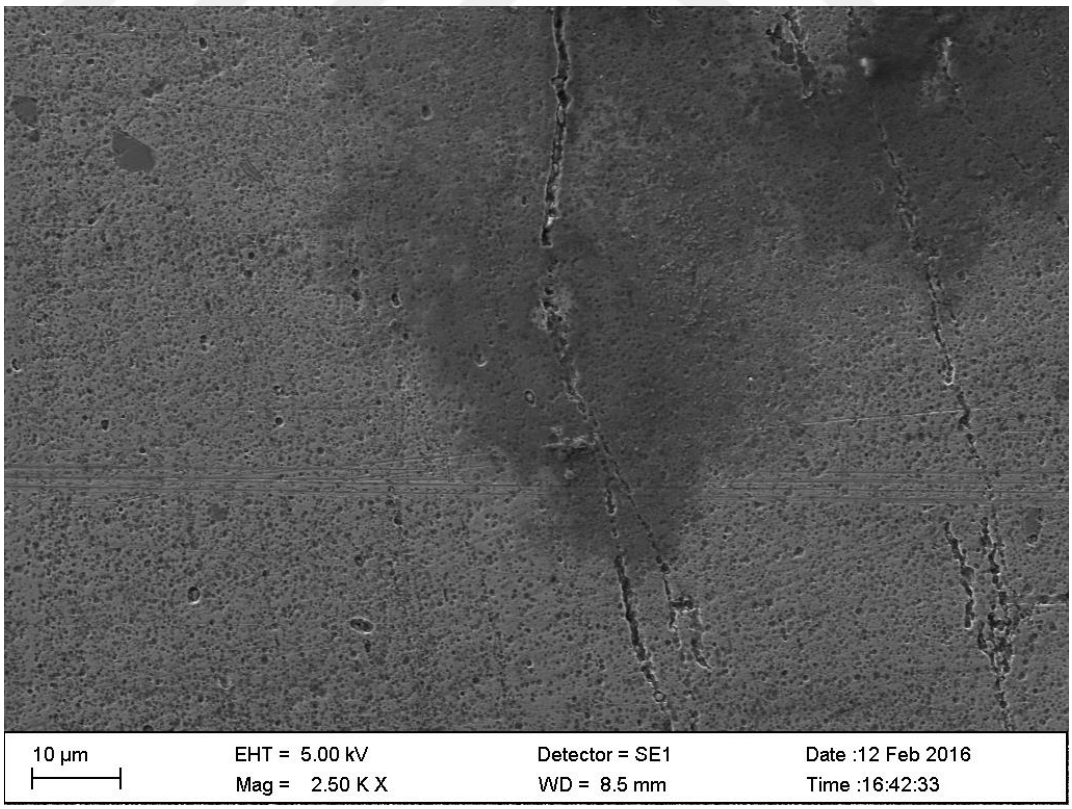
Şekil 4.132. 1400 dev/dak – 80 mm/dak (x500) – TMEB



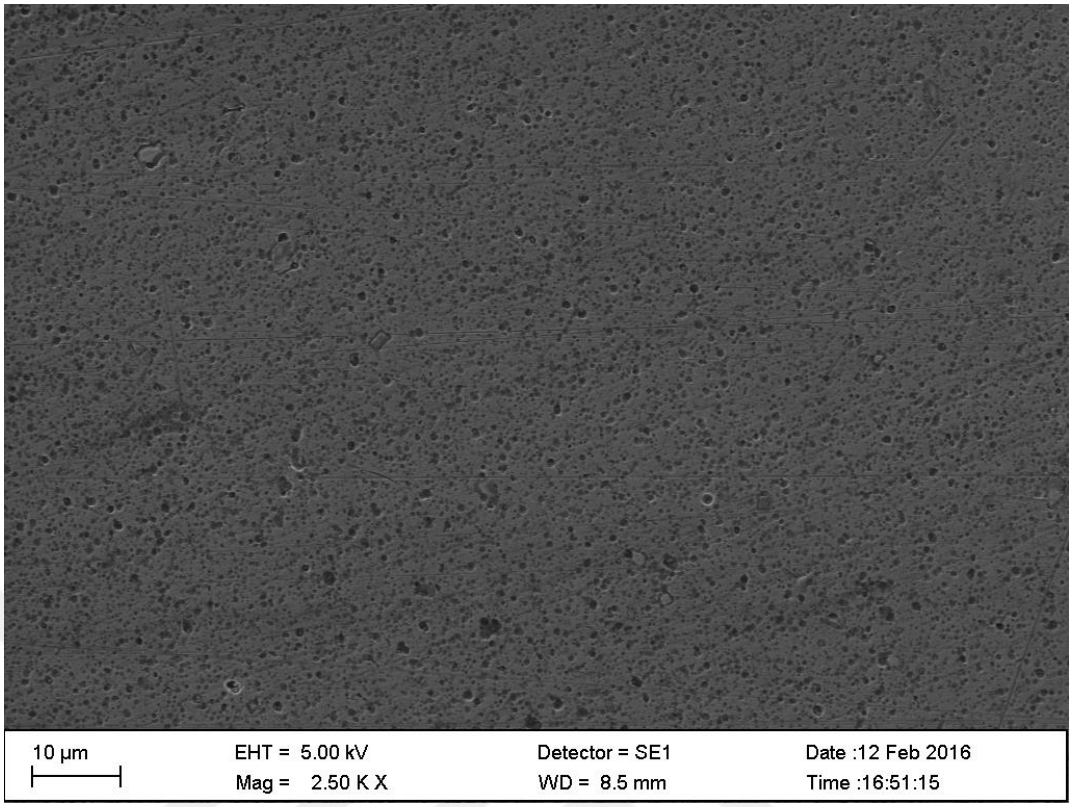
Şekil 4.133. 1400 dev/dak – 80 mm/dak (x500) – IEB



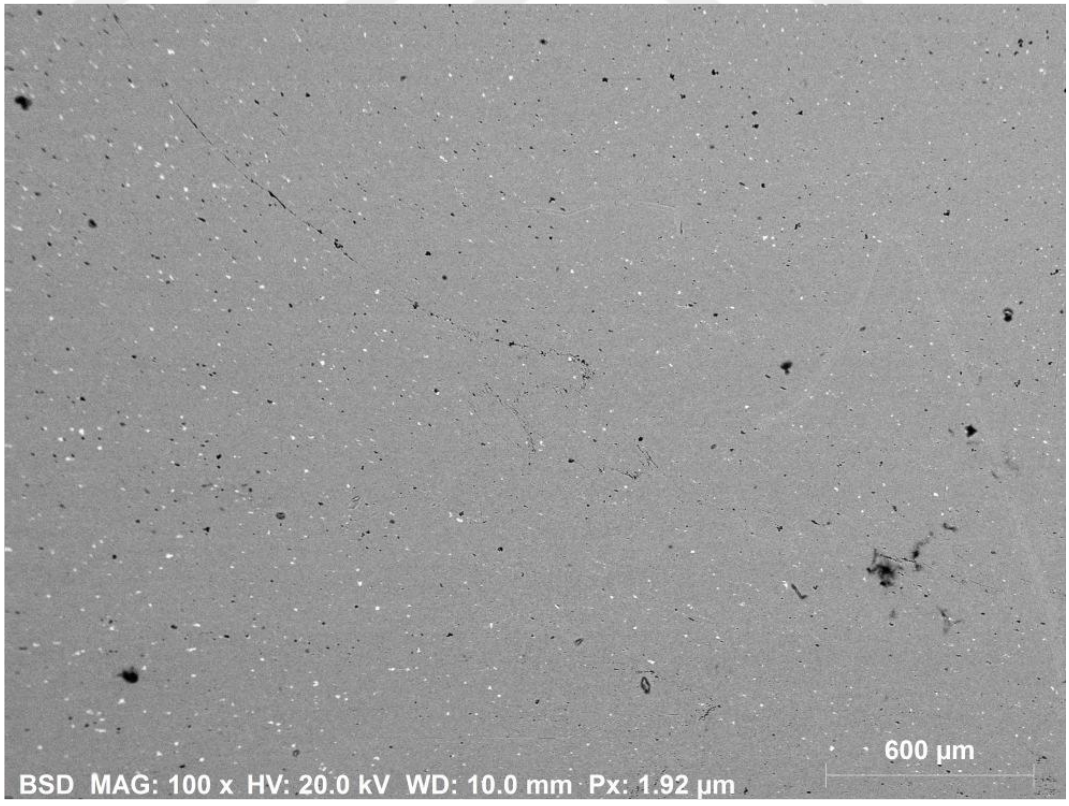
Şekil 4.134. 1400 dev/dak – 80 mm/dak (x2500) – DYKB



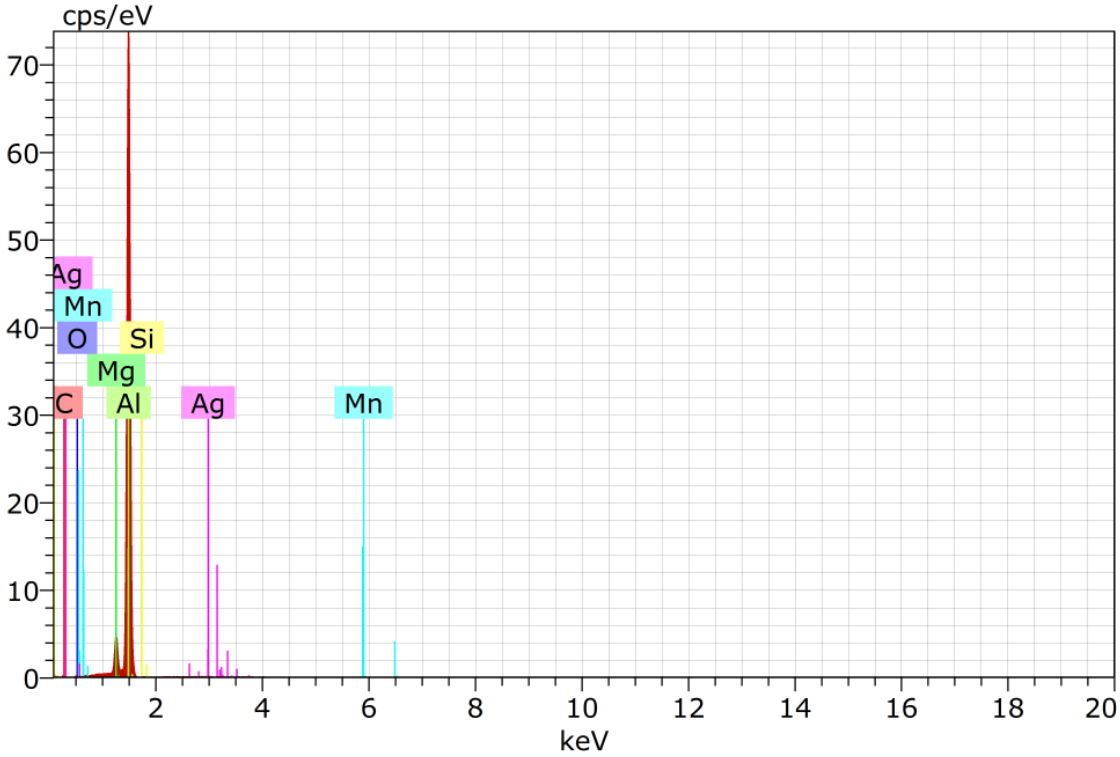
Şekil 4.135. 1400 dev/dak – 80 mm/dak (x2500) – TMEB



Şekil 4.136. 1400 dev/dak – 80 mm/dak (x2500) – IEB



Şekil 4.137. 550 dev/dak – 40 mm/dak (x100) – DYKB / EDX analizi görüntüsü

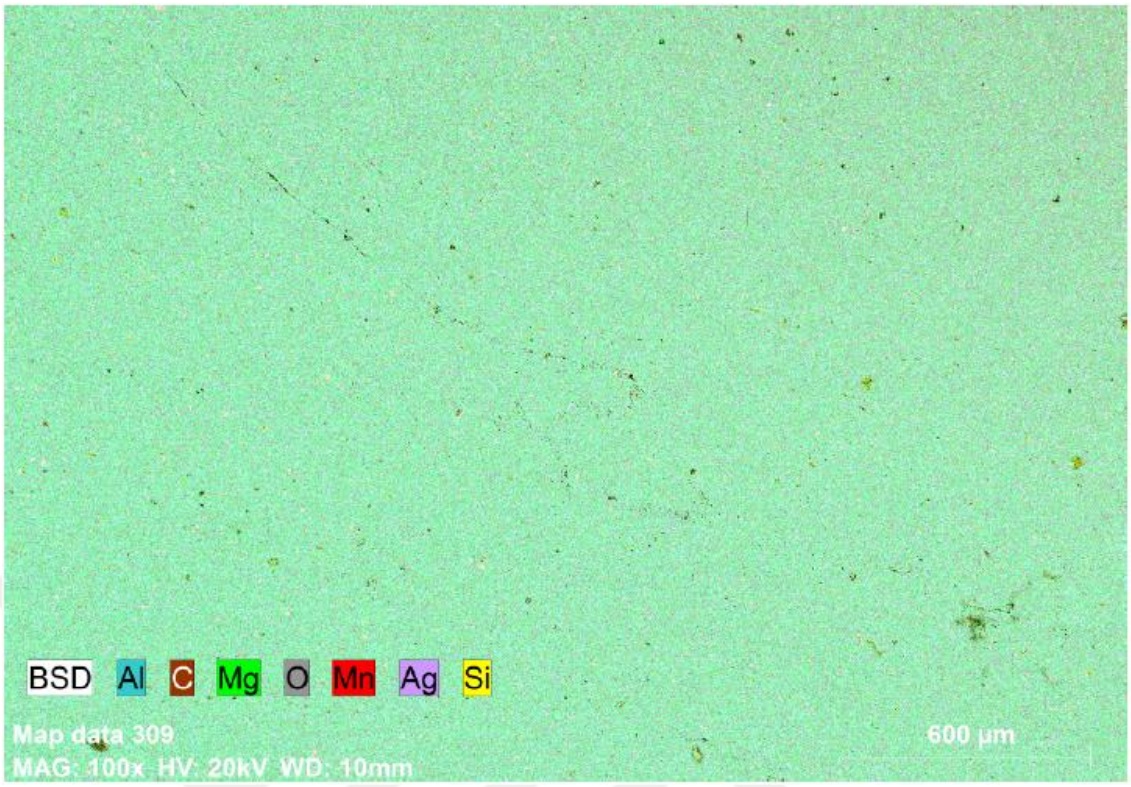


Şekil 4.138. 550 dev/dak – 40 mm/dak (x100) – DYKB / EDX analizi grafiği

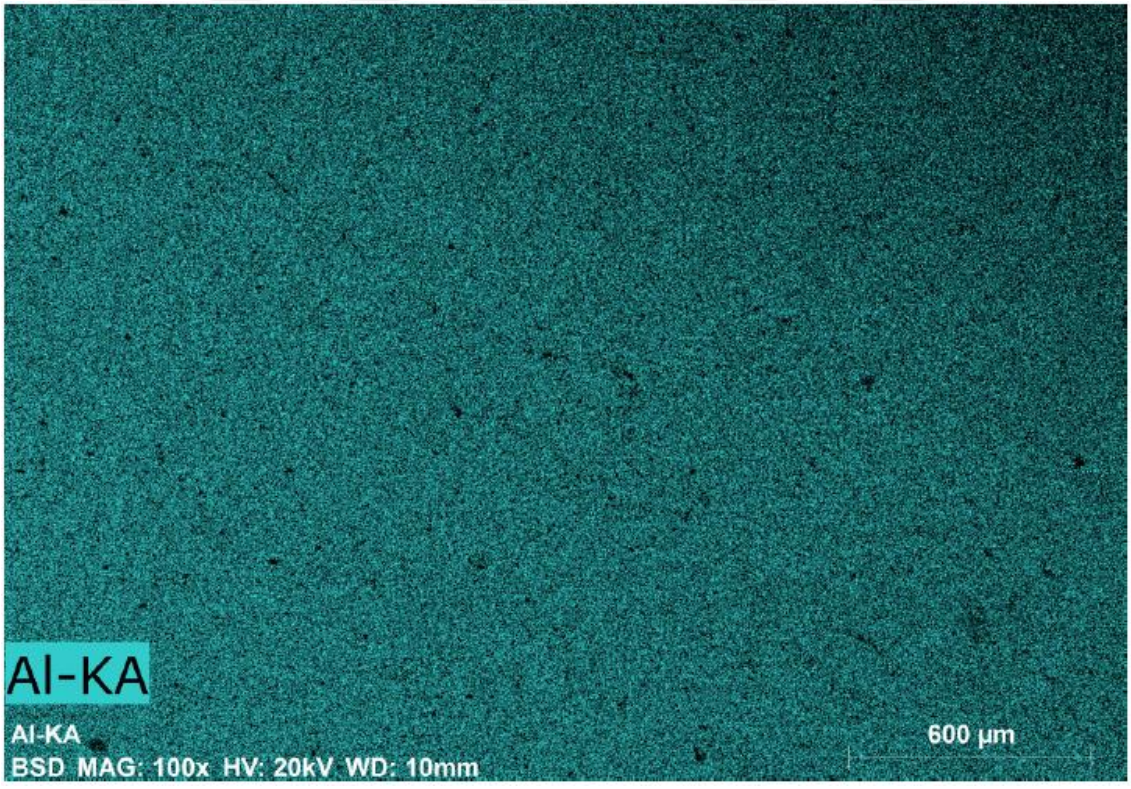
Spectrum: Acquisition 340

El	AN	Series	Net	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error (1 Sigma) [wt.%]
Al	13	K-series	314310	79.31	86.42	78.41	3.81
C	6	K-series	790	6.97	7.60	15.48	1.71
Mg	12	K-series	17296	3.53	3.85	3.88	0.22
O	8	K-series	539	1.11	1.21	1.85	0.33
Mn	25	K-series	570	0.56	0.62	0.27	0.05
Ag	47	L-series	301	0.23	0.25	0.06	0.04
Si	14	K-series	77	0.05	0.05	0.05	0.03
		Total:		91.77	100.00	100.00	

Şekil 4.139. 550 dev/dak – 40 mm/dak (x100) – DYKB / EDX analizi değerleri

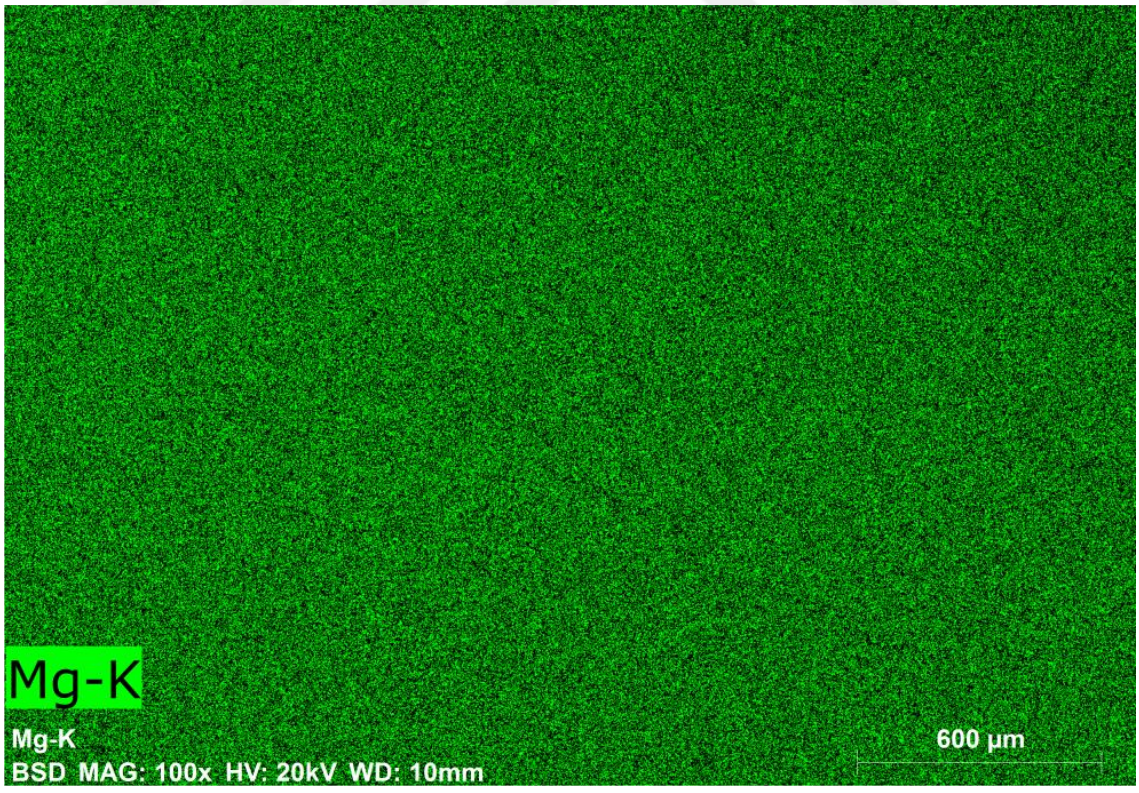


Şekil 4.140. 550 dev/dak – 40 mm/dak (x100) – DYKB / EDX analizi BSD görüntüsü



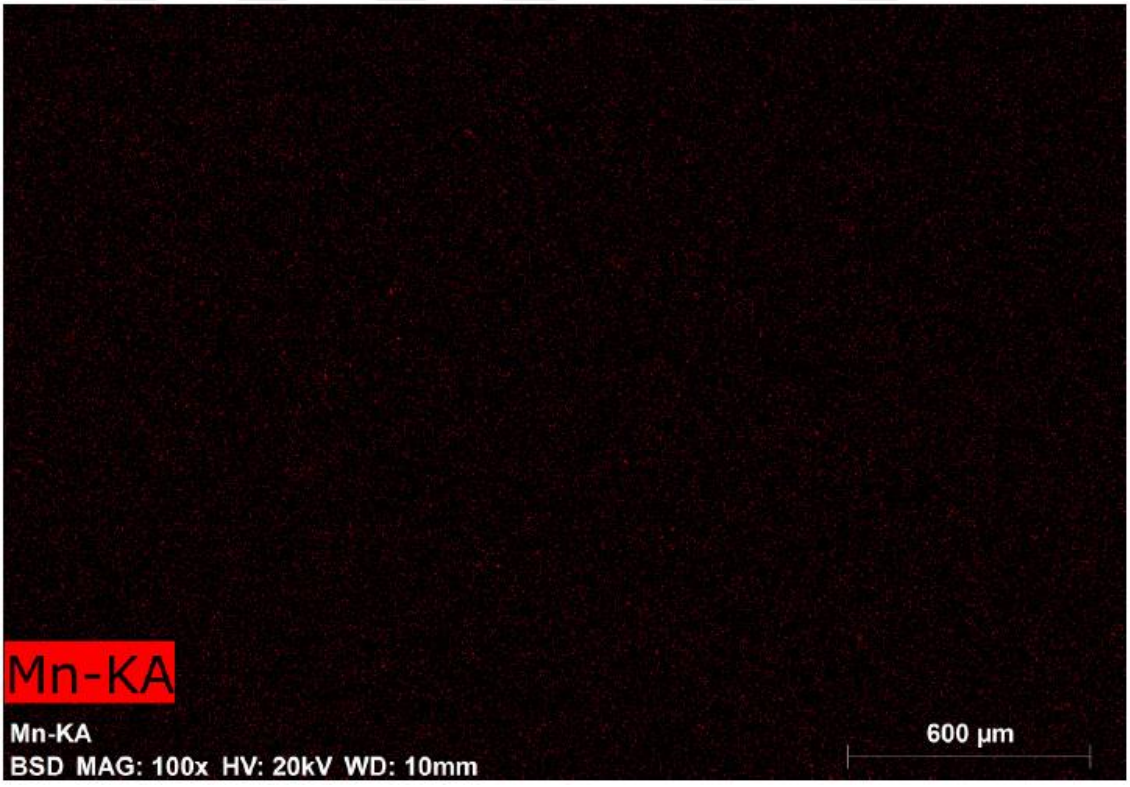
Şekil 4.141. 550 dev/dak – 40 mm/dak (x100) – DYKB / EDX analizi Al görüntüsü

Şekil 4.142. 550 dev/dak – 40 mm/dak (x100) – DYKB / EDX analizi C görüntüsü



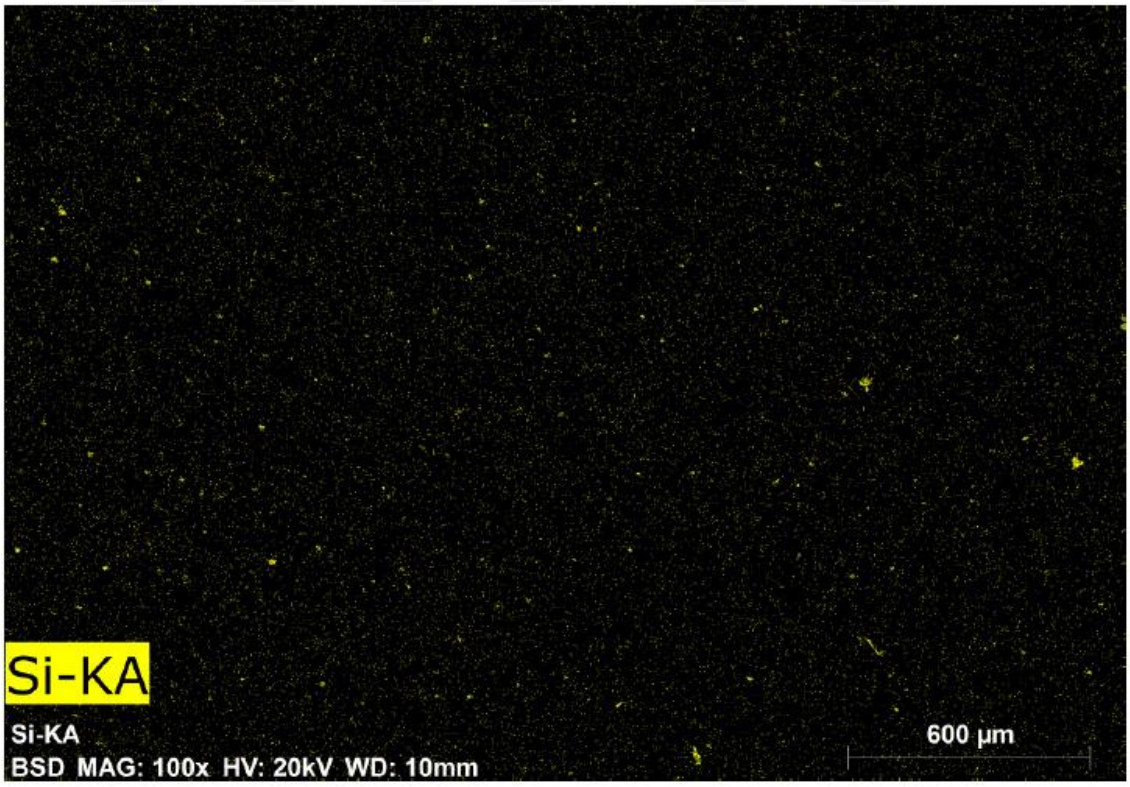
Şekil 4.143. 550 dev/dak – 40 mm/dak (x100) – DYKB / EDX analizi Mg görüntüsü

Şekil 4.144. 550 dev/dak – 40 mm/dak (x100) – DYKB / EDX analizi O görüntüsü



Şekil 4.145. 550 dev/dak – 40 mm/dak (x100) – DYKB / EDX analizi Mn görüntüsü

Şekil 4.146. 550 dev/dak – 40 mm/dak (x100) – DYKB / EDX analizi Ag görüntüsü



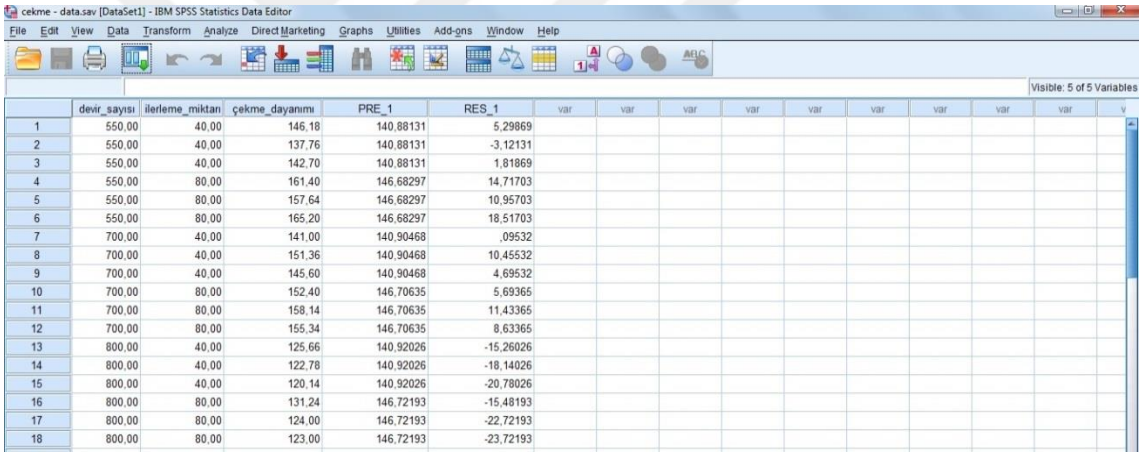
Şekil 4.147. 550 dev/dak – 40 mm/dak (x100) – DYKB / EDX analizi Si görüntüsü

Yukarıda verilen Enerji Dağılımlı X-Ray (EDX) analizlerine ait sonuçlar ve görüntüler örnek amaçlı olup tüm sonuçlar kullanılan tüm parametreler için elde edilmiştir.

4.3. İstatistiksel Analiz Sonuçları

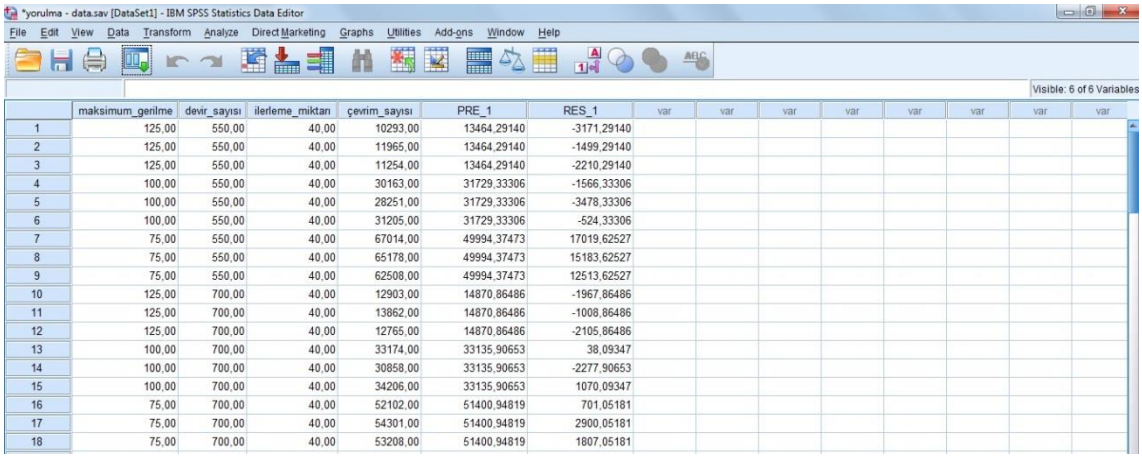
Mekanik deneylerden elde edilen sonuçların, istatistiksel analiz kapsamında güvenirlik ve geçerlilik analizleri SPSS paket programı ile incelenmiştir.

SPSS'te yer alan Regresyon Analizi Modülü ile çekme, sertlik ve yorulma deneyleri sonuçlarına göre bir takım istatistiksel analiz çalışmaları gerçekleştirilmiş olup yapılan çalışmalara ait ekran görüntüleri ve analiz sonuçları için örnekler, aşağıdaki şekillerde verilmiştir.



	devir_sayısı	ilerleme_miktarı	çekme_dayanımı	PRE_1	RES_1	var	var	var	var	var	var	var	var	var
1	550,00	40,00	146,18	140,88131	5,29869									
2	550,00	40,00	137,76	140,88131	-3,12131									
3	550,00	40,00	142,70	140,88131	1,81869									
4	550,00	80,00	161,40	146,68297	14,71703									
5	550,00	80,00	157,64	146,68297	10,95703									
6	550,00	80,00	165,20	146,68297	18,51703									
7	700,00	40,00	141,00	140,90468	,09532									
8	700,00	40,00	151,36	140,90468	10,45532									
9	700,00	40,00	145,60	140,90468	4,69532									
10	700,00	80,00	152,40	146,70635	5,69365									
11	700,00	80,00	158,14	146,70635	11,43365									
12	700,00	80,00	155,34	146,70635	8,63365									
13	800,00	40,00	125,66	140,92026	-15,26026									
14	800,00	40,00	122,78	140,92026	-18,14026									
15	800,00	40,00	120,14	140,92026	-20,78026									
16	800,00	80,00	131,24	146,72193	-15,48193									
17	800,00	80,00	124,00	146,72193	-22,72193									
18	800,00	80,00	123,00	146,72193	-23,72193									

Şekil 4.148. SPSS'te regresyon analizi için kullanılan çekme deneyleri veri girişi örneği



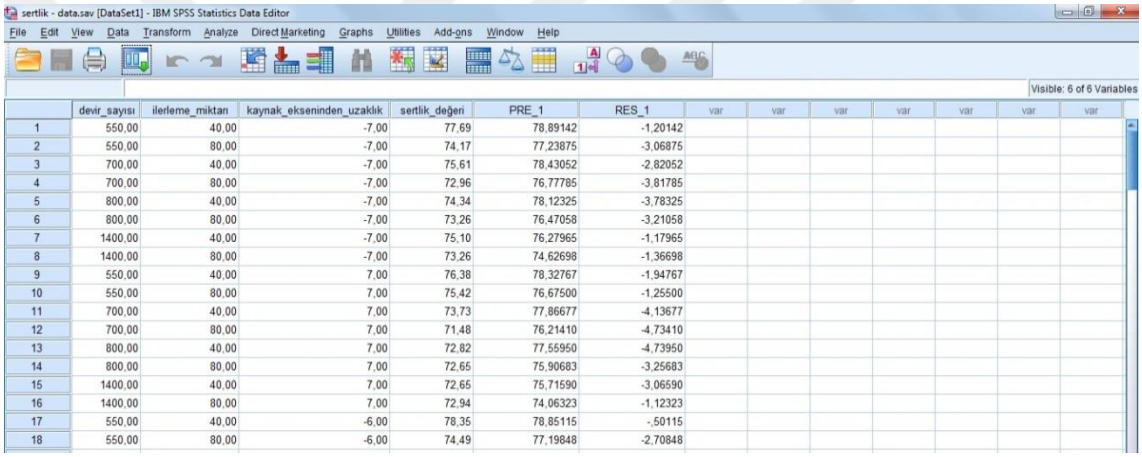
*yorulma - data.sav [DataSet1] - IBM SPSS Statistics Data Editor

File Edit View Data Transform Analyze Direct Marketing Graphs Utilities Add-ons Window Help

Visible: 6 of 6 Variables

	maksimum_gerilme	devir_sayısı	ilerleme_miktarı	çevrim_sayısı	PRE_1	RES_1	var	var	var	var	var	var	var	var
1	125,00	550,00	40,00	10293,00	13464,29140	-3171,29140								
2	125,00	550,00	40,00	11965,00	13464,29140	-1499,29140								
3	125,00	550,00	40,00	11254,00	13464,29140	-2210,29140								
4	100,00	550,00	40,00	30163,00	31729,33306	-1566,33306								
5	100,00	550,00	40,00	28251,00	31729,33306	-3478,33306								
6	100,00	550,00	40,00	31205,00	31729,33306	-524,33306								
7	75,00	550,00	40,00	67014,00	49994,37473	17019,62527								
8	75,00	550,00	40,00	65178,00	49994,37473	15183,62527								
9	75,00	550,00	40,00	62508,00	49994,37473	12513,62527								
10	125,00	700,00	40,00	12903,00	14870,86486	-1967,86486								
11	125,00	700,00	40,00	13862,00	14870,86486	-1008,86486								
12	125,00	700,00	40,00	12765,00	14870,86486	-2105,86486								
13	100,00	700,00	40,00	33174,00	33135,90653	38,09347								
14	100,00	700,00	40,00	30858,00	33135,90653	-2277,90653								
15	100,00	700,00	40,00	34206,00	33135,90653	1070,09347								
16	75,00	700,00	40,00	52102,00	51400,94819	701,05181								
17	75,00	700,00	40,00	54301,00	51400,94819	2900,05181								
18	75,00	700,00	40,00	53208,00	51400,94819	1807,05181								

Şekil 4.149. SPSS'te regresyon analizi için kullanılan yorulma deneyleri veri girişi örneği



sertlik - data.sav [DataSet1] - IBM SPSS Statistics Data Editor

File Edit View Data Transform Analyze Direct Marketing Graphs Utilities Add-ons Window Help

Visible: 6 of 6 Variables

	devir_sayısı	ilerleme_miktarı	kaynak_ekseninden_uzaklık	sertlik_değeri	PRE_1	RES_1	var	var	var	var	var	var	var
1	550,00	40,00	-7,00	77,69	78,89142	-1,20142							
2	550,00	80,00	-7,00	74,17	77,23875	-3,06875							
3	700,00	40,00	-7,00	75,61	78,43052	-2,82052							
4	700,00	80,00	-7,00	72,96	76,77785	-3,81785							
5	800,00	40,00	-7,00	74,34	78,12325	-3,78325							
6	800,00	80,00	-7,00	73,26	76,47058	-3,21058							
7	1400,00	40,00	-7,00	75,10	76,27965	-1,17965							
8	1400,00	80,00	-7,00	73,26	74,62698	-1,36698							
9	550,00	40,00	7,00	76,38	78,32767	-1,94767							
10	550,00	80,00	7,00	75,42	76,67500	-1,25500							
11	700,00	40,00	7,00	73,73	77,86677	-4,13677							
12	700,00	80,00	7,00	71,48	76,21410	-4,73410							
13	800,00	40,00	7,00	72,82	77,55950	-4,73950							
14	800,00	80,00	7,00	72,65	75,90683	-3,25683							
15	1400,00	40,00	7,00	72,65	75,71590	-3,06590							
16	1400,00	80,00	7,00	72,94	74,06323	-1,12323							
17	550,00	40,00	-6,00	78,35	78,85115	-,50115							
18	550,00	80,00	-6,00	74,49	77,19848	-2,70848							

Şekil 4.150. SPSS'te regresyon analizi için kullanılan sertlik deneyleri veri giriş örneği

Regresyon analizi çalışmasında; bir önceki bölümde yer alan (3.8) numaralı denklemden faydalanılarak, "y", çekme, sertlik ve yorulma deneylerinin sonuçları olan "bağımlı değişkenleri", "b_0", her bir deney için ayrı ayrı olmak üzere bağımsız tahmini sabit bir katsayıyı ve "b_1, b_2, b_3, …" değerleri ise yine her bir deney için ayrı ayrı olmak üzere devir sayısı, ilerleme miktarı vb. gibi "bağımsız tahmini değerleri" elde edilmiştir.

Çekme deneyleri için y bağımlı değişkeni,

$$y_1 = f(n, V) \tag{4.1}$$

Yorulma deneyleri için y bağımlı değişkeni,

$$y_2 = f(n, V, \sigma_{max}) \quad (4.2)$$

Sertlik deneyleri için y bağımlı değişkeni,

$$y_3 = f(n, V, d) \quad (4.3)$$

fonksiyonları ile ifade edilmiş ve formüllerde geçen terimler aşağıda verilmiştir;

y_1 : çekme dayanımı (MPa) bağımlı değişkeni
y_2 : çevrim sayısı (N) bağımlı değişkeni
y_3 : sertlik değeri (HV) bağımlı değişkeni
n : devir sayısı (dev/dak)
V : ilerleme hızı (mm/dak)
d : kaynak ekseninden uzaklık (mm)
σ_{max} : maksimum gerilme (MPa)

Yukarıda verilen fonksiyonlardan elde edilen formüller aşağıda verilmiştir;

Çekme deneyleri için elde edilen bağımlı değişken formülü;

$$y_1 = b_0 + b_1.n + b_2.V \quad (4.4)$$

Yorulma deneyleri için elde edilen bağımlı değişken formülü;

$$y_2 = b_0 + b_1.n + b_2.V + b_3.\sigma_{max} \quad (4.5)$$

Sertlik deneyleri için elde edilen bağımlı değişken formülü;

$$y_3 = b_0 + b_1.n + b_2.V + b_3.d \quad (4.6)$$

olarak belirlenmiş, daha sonra sırasıyla çekme, yorulma ve sertlik deneylerine ait regresyon analizi çalışmalarına ait sonuçlar da aşağıda açıklanmıştır.

```
GET
  FILE='F:\çalışma\altı aylık raporlar\anova - tez\cekme - data.sav'.
DATASET NAME DataSet1 WINDOW=FRONT.
REGRESSION
  /MISSING LISTWISE
  /STATISTICS COEFF OUTS CI(95) R ANOVA
  /CRITERIA=PIN(.05) POUT(.10)
  /NOORIGIN
  /DEPENDENT çekme_dayanımı
  /METHOD=ENTER devir_sayısı ilerleme_miktarı
  /SAVE PRED RESID.
```

Regression

```
[DataSet1] F:\çalışma\altı aylık raporlar\anova - tez\cekme - data.sav
```

Variables Entered/Removed[a]

Model	Variables Entered	Variables Removed	Method
1	ilerleme_miktarı, devir_sayısı[b]	.	Enter

a. Dependent Variable: çekme_dayanımı

b. All requested variables entered.

Model Summary[b]

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	,221[a]	,049	-,042	13,65562

a. Predictors: (Constant), ilerleme_miktarı, devir_sayısı

b. Dependent Variable: çekme_dayanımı

ANOVA[a]

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	202,017	2	101,008	,542	,590[b]
	Residual	3915,996	21	186,476		
	Total	4118,013	23			

a. Dependent Variable: çekme_dayanımı

b. Predictors: (Constant), ilerleme_miktarı, devir_sayısı

Şekil 4.151. SPSS'te çekme deneyleri regresyon analizi sonucu - 1

Coefficients[a]

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	134,994	11,539		11,698	,000
	devir_sayısı	,000	,009	,004	,018	,986
	ilerleme_miktarı	,145	,139	,221	1,041	,310

Coefficients[a]

Model		95,0% Confidence Interval for B	
		Lower Bound	Upper Bound
1	(Constant)	110,996	158,992
	devir_sayısı	-,018	,018
	ilerleme_miktarı	-,145	,435

a. Dependent Variable: çekme_dayanımı

Residuals Statistics[a]

	Minimum	Maximum	Mean	Std. Deviation	N
Predicted Value	140,8813	146,8154	143,8308	2,96367	24
Residual	-23,72193	18,51703	,00000	13,04840	24
Std. Predicted Value	-,995	1,007	,000	1,000	24
Std. Residual	-1,737	1,356	,000	,956	24

a. Dependent Variable: çekme_dayanımı

Şekil 4.152. SPSS'te çekme deneyleri regresyon analizi sonucu - 2

İstatistiksel analiz sonucunda çekme deneyleri için elde edilen bağımlı değişken formülü;

$$y_1 = 134{,}994 + 0{,}145.V \tag{4.7}$$

Denklemden de anlaşılacağı üzere "y_1" çekme dayanımı bağımlı değişkeninin üzerinde "b_0" bağımsız tahmini sabit katsayının etkisi ve sadece ilerleme miktarı bağımsız tahmini değerinin bir etkisi olduğu görülmektedir. Devir sayısı bağımsız tahmini değerinin etkisi ise görülmemektedir.

```
REGRESSION
  /MISSING LISTWISE
  /STATISTICS COEFF OUTS CI(95) R ANOVA
  /CRITERIA=PIN(.05) POUT(.10)
  /NOORIGIN
  /DEPENDENT çevrim_sayısı
  /METHOD=ENTER devir_sayısı ilerleme_miktarı maksimum_gerilme
  /SAVE PRED RESID.
```

Regression

```
[DataSet1] F:\çalışma\altı aylık raporlar\anova - tez\yorulma - data.sav
```

Variables Entered/Removed[a]

Model	Variables Entered	Variables Removed	Method
1	maksimum_gerilme, ilerleme_miktarı, devir_sayısı[b]	.	Enter

a. Dependent Variable: çevrim_sayısı

b. All requested variables entered.

Şekil 4.153. SPSS'te yorulma deneyleri regresyon analizi sonucu - 1

Model Summary[b]

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	,954[a]	,910	,906	4919,37515

a. Predictors: (Constant), maksimum_gerilme, ilerleme_miktarı, devir_sayısı

b. Dependent Variable: çevrim_sayısı

ANOVA[a]

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	16706172197	3	5568724066	230,110	,000[b]
	Residual	1645617129	68	24200251,90		
	Total	18351789326	71			

a. Dependent Variable: çevrim_sayısı

b. Predictors: (Constant), maksimum_gerilme, ilerleme_miktarı, devir_sayısı

Şekil 4.154. SPSS'te yorulma deneyleri regresyon analizi sonucu - 2

Coefficients[a]

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	100985,980	3718,475		27,158	,000
	devir_sayısı	9,377	1,796	,190	5,222	,000
	ilerleme_miktarı	-33,848	28,988	-,042	-1,168	,247
	maksimum_gerilme	-730,602	28,402	-,934	-25,724	,000

Coefficients[a]

Model		95,0% Confidence Interval for B	
		Lower Bound	Upper Bound
1	(Constant)	93565,878	108406,083
	devir_sayısı	5,794	12,961
	ilerleme_miktarı	-91,692	23,996
	maksimum_gerilme	-787,277	-673,926

a. Dependent Variable: çevrim_sayısı

Residuals Statistics[a]

	Minimum	Maximum	Mean	Std. Deviation	N
Predicted Value	12110,3750	57964,9570	33982,7361	15339,43284	72
Residual	-10227,41602	17019,62500	,00000	4814,32301	72
Std. Predicted Value	-1,426	1,563	,000	1,000	72
Std. Residual	-2,079	3,460	,000	,979	72

a. Dependent Variable: çevrim_sayısı

Şekil 4.155. SPSS'te yorulma deneyleri regresyon analizi sonucu - 3

İstatistiksel analiz sonucunda yorulma deneyleri için elde edilen bağımlı değişken formülü;

$$y_2 = 100985{,}980 + 9{,}377.n - 33{,}848.V - 730{,}602.\sigma_{max} \quad (4.8)$$

Denklemden de anlaşılacağı üzere "y_2" yorulma dayanımı bağımlı değişkeninin üzerinde "b_0" bağımsız tahmini sabit katsayının etkisi ile devir sayısı, ilerleme miktarı ve maksimum gerilme bağımsız tahmini değerlerinin ayrı ayrı etkileri olduğu görülmektedir.

```
GET
  FILE='F:\çalışma\altı aylık raporlar\anova - tez\sertlik - data.sav'.
DATASET NAME DataSet1 WINDOW=FRONT.
REGRESSION
  /MISSING LISTWISE
  /STATISTICS COEFF OUTS CI(95) R ANOVA
  /CRITERIA=PIN(.05) POUT(.10)
  /NOORIGIN
  /DEPENDENT sertlik_değeri
  /METHOD=ENTER devir_sayısı ilerleme_miktarı kaynak_ekseninden_uzaklık
  /SAVE PRED RESID.
```

Regression

```
[DataSet1] F:\çalışma\altı aylık raporlar\anova - tez\sertlik - data.sav
```

Variables Entered/Removed[a]

Model	Variables Entered	Variables Removed	Method
1	kaynak_ekseninden_uzaklık, ilerleme_miktarı, devir_sayısı[b]	.	Enter

a. Dependent Variable: sertlik_değeri

b. All requested variables entered.

Şekil 4.156. SPSS'te sertlik deneyleri regresyon analizi sonucu - 1

Model Summary[b]

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	,443[a]	,196	,176	2,67961

a. Predictors: (Constant), kaynak_ekseninden_uzaklık, ilerleme_miktarı, devir_sayısı

b. Dependent Variable: sertlik_değeri

ANOVA[a]

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	203,646	3	67,882	9,454	,000[b]
	Residual	832,915	116	7,180		
	Total	1036,561	119			

a. Dependent Variable: sertlik_değeri

b. Predictors: (Constant), kaynak_ekseninden_uzaklık, ilerleme_miktarı, devir_sayısı

Şekil 5.157. SPSS'te sertlik deneyleri regresyon analizi sonucu - 2

Coefficients[a]

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t
		B	Std. Error	Beta	
1	(Constant)	81,952	1,013		80,928
	devir_sayısı	-,003	,001	-,338	-4,055
	ilerleme_miktarı	-,041	,012	-,281	-3,378
	kaynak_ekseninden_uzaklık	-,040	,057	-,059	-,711

Coefficients[a]

Model		Sig.	95,0% Confidence Interval for B	
			Lower Bound	Upper Bound
1	(Constant)	,000	79,946	83,958
	devir_sayısı	,000	-,005	-,002
	ilerleme_miktarı	,001	-,066	-,017
	kaynak_ekseninden_uzaklık	,478	-,152	,072

a. Dependent Variable: sertlik_değeri

Residuals Statistics[a]

	Minimum	Maximum	Mean	Std. Deviation	N
Predicted Value	74,0632	78,8914	76,8230	1,30817	120
Residual	-5,81731	6,89046	,00000	2,64562	120
Std. Predicted Value	-2,110	1,581	,000	1,000	120
Std. Residual	-2,171	2,571	,000	,987	120

a. Dependent Variable: sertlik_değeri

Şekil 4.158. SPSS'te sertlik deneyleri regresyon analizi sonucu - 3

İstatistiksel analiz sonucunda sertlik deneyleri için elde edilen bağımlı değişken formülü;

$$y_3 = 81{,}952 - 0{,}003.n - 0{,}041.V - 0{,}040.d \quad (4.9)$$

Denklemden de anlaşılacağı üzere "y_3" sertlik değeri bağımlı değişkeninin üzerinde "b_0" bağımsız tahmini sabit katsayının etkisi ile devir sayısı, ilerleme miktarı ve kaynak ekseninden uzaklık bağımsız tahmini değerlerinin ayrı ayrı etkileri olduğu görülmektedir.

BÖLÜM 5

TARTIŞMA

Tez çalışması kapsamında 5083 alüminyum alaşımları SKK yöntemi ile birleştirilmiş olup elde edilen sonuçlar incelendiğinde, çekme deneyleri, yorulma deneyleri, mikro sertlik deneyleri ve mikroyapı deneyleri üzerinden çeşitli değerlendirmeler yapılmış ve sonuçlar bölümünde bunlar açıklanmıştır.

Ergitme esaslı sıvı hal kaynak yöntemlerine kıyasla ısı girdileri daha az olduğu için birleştirilmiş olan tüm numunelerde herhangi bir çarpılma gözlenmemiştir.

Çekme deneyleri sonuçlarına göre, literatür çalışmalarına benzer şekilde deneylerde kullanılan ilerleme hızları ve devir sayılarının kaynaklı birleştirmeler için yeterli olduğu görülmüştür.

Şekil 4.3 incelendiğinde sonuçlar bölümünde de açıklandığı üzere, tüm çekme deneyleri için maksimum çekme dayanımı değerlerinin, ilerleme hızlarının düşük ve devir sayılarının yüksek olduğu durumlarda arttığı tespit edilmiştir. Bu durumun, 700 dev/dak – 40 mm/dak ve 800 dev/dak – 80 mm/dak ile gerçekleştirilen deneylerde diğer deneylere göre daha yüksek olduğu açıkça görülmektedir.

Deneylerde en düşük devir sayısı olan 550 dev/dak ile elde edilen numunelerin çekme dayanımı değerleri diğer tüm devir sayıları ile elde edilen numunelerin çekme dayanımı değerlerinden düşüktür. 1400 dev/dak elde edilen numunelerde de ilerleme hızının 40 mm/dak olduğu durumlarda daha iyi değerler elde edildiği belirlenmiştir.

Anlaşıldığı üzere SKK ile birleştirmelerde çekme dayanımları için iyi sonuçların düşük ilerleme hızları ile elde edildiği açıktır. Bu durum daha önce gerçekleştirilmiş olan benzeri çalışmalarla da uyum göstermektedir. Aşağıda literatür çalışmalarından benzer örnekler verilmiştir.

Hirata vd. (2007), Malyer (2010), Vijayan vd. (2010), Anand vd. (2020) ve Al-Roubaiy vd. (2020)'nin 5083 alaşımları için tez çalışmasında kullanılan parametrelere yakın değerler ile yapmış oldukları çalışmalarda, benzer biçimde ilerleme hızlarının artması ile çekme dayanımlarının azalmış olduğu gözlenmiş olup tez çalışması da bu sonuçlar ile benzerlik göstermektedir.

Dilek (2006), Paik (2009), Han (2009), Kumar vd. (2017), El-Sayed vd. (2018), Chander vd. (2018), Prabha vd. (2018), Trukhanov vd. (2021), Sahu vd. (2021), Chennaiah vd. (2021) , Saravanakumar vd. (2022) ve Verma vd. (2022)'nin 5083 alaşımları için tez çalışmasında kullanılan parametrelere yakın değerler ile yapmış oldukları çalışmalarda, tez çalışmasında elde edilen maksimum çekme dayanımı değerlerine yakın değerler elde edildiği görülmektedir.

Yukarıda açıklananlar dahilinde çekme deneyleri için tez çalışmasında elde edilen sonuçların, literatür çalışmalarında elde edilen sonuçlar ile yakın benzerlik gösterdiği aşikardır. Bu durum, tez çalışmasında elde edilen sonuçların güvenilirlik ve geçerlilik açısından doğruluğunu kanıtlar nitelik taşımaktadır.

Yorulma deneyleri sonuçlarına göre, literatür çalışmalarına benzer şekilde deneylerde kullanılan ilerleme hızları ve devir sayılarının kaynaklı birleştirmeler için yeterli olduğu görülmüştür.

Şekil 4.4 ve Şekil 4.5 incelendiğinde sonuçlar bölümünde de açıklandığı üzere, tüm yorulma deneyleri için çevrim sayısı değerlerinin, devir sayılarının ve ilerleme hızlarının yüksek olduğu durumlarda arttığı, düşük devir sayısı ile birleştirilmiş olan numunelerin, orta devir sayısı ve yüksek devir sayısı ile birleştirilmiş olan numunelere göre daha erken çatlak oluşarak kırıldığı tespit edilmiştir. İlerleme hızlarının birleştirmeler üzerindeki etkisi incelendiğinde benzer şekilde artış ile birlikte çevrim sayılarının arttığı tespit edilmiştir.

Şekil 4.6 maksimum gerilme – çevrim sayısı grafiğinde tüm sonuçlar bir arada gösterilmektedir. Devir sayıları ve ilerleme hızlarının etkisi daha net olarak anlaşılabilmektedir. Devir sayıları ve ilerleme hızlarının artmasıyla birlikte çevrim sayılarının arttığı açıkça görülmektedir.

İstatistiksel analiz çalışmalarından da anlaşılacağı üzere devir sayıları, ilerleme hızları ve maksimum çekme dayanımlarının, yorulma deneylerinde yorulma dayanımı bağımlı değişkeni üzerinde önemli rol oynadığı ortaya çıkmıştır.

Dilek (2006)'in 5083 alüminyum alaşımları için tez çalışmasında kullanılan parametrelere yakın değerler olan 20 mm/dak, 50 mm/dak, 80 mm/dak ilerleme hızları ve 1400 dev/dak devir sayısı ile gerçekleştirmiş olduğu yorulma deneylerinde elde edilen çevrim sayılarının, tez çalışmasında elde edilen değerlere yakın değerler elde edildiği görülmektedir. Bu durum önceki çalışmalarla örnekleme açısından önem arz etmektedir.

Tanrıöver (2008) tarafından farklı alüminyum alaşımları olan 5052 ile 2024 alaşımlarının SKK ile birleştirilmesi üzerine gerçekleştirilen tez çalışmasında 900 dev/dak, 1120 dev/dak, 1400 dev/dak devir sayıları ve 125 mm/dak, 160 mm/dak, 200 mm/dak ilerleme hızları kullanılmış olup yorulma dayanımları açısından benzer orantıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

Yine benzer şekilde Kafalı (2009) ve Sayaca (2010) 20XX serisi alüminyum alaşımları için, Yıldırım (2010) 30XX serisi alüminyum alaşımları için, Sayer (2007) ve Kafalı (2011) 60XX serisi alüminyum alaşımları için tez çalışmalarında benzer parametreler ile yorulma deneyleri gerçekleştirmiş olup elde ettikleri sonuçlar da orantısal olarak benzerlik göstermiştir. Farklı serilerden alüminyum alaşımları olmasına rağmen örnekleme açısından değerlendirilebilir.

Zhou vd. (2005)'nin 5083 alüminyum alaşımlarında SKK'nın yorulma özellikleri üzerine gerçekleştirmiş oldukları çalışmada tez çalışmasına yakın gerilme genlikleri olan 80 MPa, 100 MPa ve 120 MPa ile elde edilen çevrim sayılarının, tez çalışmasına yakın sonuçlar olduğu görülmektedir.

Benzer şekilde Jesus vd. (2016)'nin SKK ile birleştirilmiş 5083 alüminyum alaşımlarının yorulma özellikleri için yapmış oldukları çalışmada yine tez çalışmasına yakın gerilme değerleri ile elde etmiş oldukları sonuçların tez çalışması ile yakın sonuçlar olduğu ve Lombard vd. (2008)'nin 5083 alüminyum alaşımlarında yorulma ömrünü arttırmak ve hataları azaltmak için SKK parametrelerinin optimize edilmesi üzerine yapmış oldukları çalışmada tez çalışmasına yakın devir sayıları ile elde edilen çevrim sayılarının tez çalışması ile benzer olduğu görülmektedir.

Mikro sertlik deneyleri sonuçları incelendiğinde, tez çalışmasında kullanılan ilerleme hızları ve devir sayılarının kaynaklı birleştirmeler için literatürde incelenen sonuçlara benzer olduğu tespit edilmiştir.

Dilek (2006)'in 5083 alüminyum alaşımları için tez çalışmasında kullanılan parametrelere yakın değerler olan 20 mm/dak, 50 mm/dak, 80 mm/dak ilerleme hızları ve

1400 dev/dak devir sayısı ile yapmış olduğu mikro sertlik deneylerinde elde edilen sonuçların, tez çalışmasında elde edilen değerlere yakın değerler elde edildiği görülmektedir. Örneğin 1400 dev/dak devir sayısı ve 80 mm/dak ilerleme hızı ile kaynak merkezi için elde etmiş olduğu sertlik değeri 55 HV olup tez çalışmasında aynı parametreler için kaynak merkezi için elde edilen sertlik değeri 76,70 HV'dir. Bu durum da tez çalışmasında gerçekleştirilen kaynaklı bağlantıların sertliği açısından daha yüksek değerlere ulaşılabildiğini göstermektedir.

Benzer şekilde James vd. (2003) tarafından 5083 alüminyum alaşımlarında SKK'nın yorulma ömrü üzerine takım ilerleme hızlarının etkisi üzerine yapılan çalışmada, 500 dev/dak devir sayısı ve 80 mm/dak ilerleme hızı kullanılmıştır. Tez çalışmasında elde edilen sertlik değerleri, bu çalışmada elde edilen değerler ile yakın değerlerdedir.

Huang vd. (2011) 5083 alüminyum alaşımlarının sürtünme karıştırma işlemi sonrası dayanımları araştırmış oldukları çalışmada, tez çalışmasına göre 2.300 dev/dak devir sayısı ve 160 mm/dak ilerleme hızı gibi daha yüksek devir sayıları ve ilerleme hızları kullanılmıştır. Kıyaslama açısından sertlik değerleri incelenirse, ilgili çalışmada elde edilen sonuçlarda ve tez çalışmasında elde edilen sonuçlarda kaynak ekseninden uzaklaştıkça benzer eğime sahip oldukları aşikardır.

Jesus vd. (2016) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, 660 dev/dak ve 1140 dev/dak devir sayıları ile 60 mm/dak ilerleme hızları kullanılmıştır. Tez çalışmasında farklı devir sayıları ve farklı ilerleme hızları için yine bu çalışmaya yakın sertlik değerleri elde edilmiştir.

Behnagh vd. (2016) tarafından sürtünme karıştırma işlemi üzerine yapılan çalışmada 800 dev/dak devir sayısı ve 50 mm/dak ilerleme hızı kullanılmıştır. Bu parametreler, tez çalışmasında kullanılan 800 dev/dak devir sayısı ve 40 mm/dak olan parametreye çok yakındır. Tez çalışmasında bu parametre için elde edilen sertlik değerleri, bu çalışma ile karşılaştırıldığında, bir miktar daha düşük kalmıştır. Bunun sebebi, tez çalışmasında kullanılan takımın geometrik profili ile ilgili çalışmada kullanılan takımın geometrik profilinin farklı olması olabilir.

Xu vd. (2018) tarafından 5083 alüminyum alaşımlarının SKK ile sürtünme karıştırma nokta kaynağı çalışmasında 2.300 dev/dak devir sayısı kullanılmış olup nokta kaynağı olmasından dolayı ilerleme hızı bulunmamaktadır. Tez çalışması ile devir sayısı

farklı olmasına ve ilerleme hızı bulunmamasına rağmen kıyaslama açısından değerlendirilmiştir.

Al-Roubaiy vd. (2020) 5083 alüminyum alaşımlarının birleştirilmesinde 450 dev/dak, 560 dev/dak ve 710 dev/dak devir sayıları ile 69 mm/dak, 86 mm/dak ve 116 mm/dak ilerleme hızları kullanılmıştır. Tez çalışması bu çalışma ile karşılaştırıldığında benzer orantısal eğimlerin elde edildiği görülmektedir.

İstatistiksel analiz çalışmalarından da anlaşılacağı üzere devir sayıları, ilerleme hızları ve kaynak ekseninden uzaklıkların, mikro sertlik deneylerinde sertlik değeri bağımlı değişkeni üzerinde önemli rol oynadığı ortaya çıkmıştır.

Tüm bu sonuçlar, 5083 alüminyum alaşımları için doğru belirlenen optimum parametreler ile yapılan birleştirmelerin istenilen sertlik değerleri elde etmek için yeterli olabileceğini göstermektedir. Ayrıca tez çalışmasında kullanılan yeni parametreler ile elde edilen yeni sertlik değerleri de bundan sonraki çalışmalar için örnek teşkil edebilecektir.

Tez çalışmasında kullanılan devir sayıları ve ilerleme hızları ile elde edilen mikroyapı deneyleri sonuçları, literatür çalışmaları ile kıyaslamalar yapılıp aşağıda detaylı biçimde verilmiştir.

Peel vd. (2003) tarafından 5083 alüminyum alaşımlarının SKK için gerçekleştirilen çalışmada 100 mm/dak, 150 mm/dak ve 200 mm/dak ilerleme hızları kullanılmıştır. İlgili çalışma ile tez çalışmasında kullanılan ilerleme hızları birbirinden farklıdır, çalışmadaki Şekil 2 ve Şekil 6 ile tez çalışmasında SEM ile elde edilen şekiller karşılaştırılmıştır. İlgili çalışmada Mg-Si fazı oluşumları ile ilgili bilgiler verilmiştir. Ayrıca, tez çalışmasında elde edilen görüntüler literatürdeki bu çalışma ile uyumlu olup kaynak çizgileri, boşluklar ve çatlak yayılımları benzerlik göstermektedir.

Huang vd. (2011) vd.'nin 5083 alüminyum alaşımlarının sürtünme karıştırma işlemi sonrası dayanımları araştırmış oldukları çalışmada, mikroyapısal özelliklerin etkisi araştırılmıştır. İlgili çalışmada sürtünme karıştırma bölgesinde kalan çözünmeyen fakat ve katı halde yumuşamanın etkisi ile karıştırılan $Al_6(Mn, Fe)$ tipi faz oluşumları ile ilgili bilgiler verilmiş olup şekiller üzerinde gösterilmiştir.

Choi vd. (2013) tarafından gerçekleştirilen çalışmada 700 dev/dak, 1050 dev/dak ve 1600 dev/dak devir sayıları kullanılmıştır. İlgili çalışma ile tez çalışmasında kullanılan devir sayılarından ikisi birbirinden farklıdır, çalışmadaki Şekil 5 ve Şekil 6 ile tez

çalışmasında SEM ile elde edilen şekiller karşılaştırılmıştır. İlgili çalışmada β fazı (Al_3Mg_2) oluşumları ile ilgili bilgiler verilmiştir.

Tez çalışmasında da Peel vd. (2003) ve Huang vd. (2011)'nin çalışmalarına benzer şekilde Mg-Si fazı ve Al_6(Mn, Fe) tipi faz oluşumları ve Choi vd. (2013) çalışmasına benzer şekilde β fazı (Al_3Mg_2) oluşumu açıkça görülmektedir.

Benzer şekilde Saravanakumar vd. (2022) tarafından 5083 alüminyum alaşımlarının SKK ile birleştirilmesinde takım profilinin mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisinin araştırıldığı çalışmada, mikroyapı görüntüleri ile tez çalışmasında elde edilen mikroyapı görüntüleri karşılaştırılmıştır. DYKB, TMEB ve IEB benzerlikleri için yapılan incelemelerde birbirine yakın görüntüler ortaya çıkmaktadır.

Bu yöntemin endüstride yaygın olarak kullanılabilmesi için her malzemeye göre kaynak parametrelerinin, takım şekillerinin ve ölçülerinin net belirlenmesi ve kaynak işlemleri için gerekli kaynak prosedürlerinin oluşturulması gerekmektedir. Bu bilgilerin elde edilebilmesi için de daha fazla deneysel çalışmanın yapılması gerekmektedir.

KAYNAKLAR

Ağca, E. (2010). *Doğrusal Olmayan Takım Yoluyla Alüminyum Alaşımlı Sac Malzemelerin Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile Birleştirilmesi ve Kaynak Bölgesinin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Akkaş, G. (2012). *AA 6013-T651 Alüminyum Alaşımında Sürtünme Karıştırma Kaynağının, Mikroyapı ve Mekanik Özellikler Üzerindeki Etkileri*, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.

Al-Roubaiy, A.O., Nabat, S.M. & Batako, A.D. (2020). An Investigation into Friction Stir Welding of Aluminium Alloy 5083-H116 Similar Joints, *Materials Today: Proceedings*, *22*(4), 2140-2152.

Anand, R. & Sridhar, V.G. (2020). Studies on Process Parameters and Tool Geometry Selecting Aspects of Friction Stir Welding – A Review, *Materials Today: Proceedings*, *27*(1), 576-583.

Askeland, D.R. (1998). *Malzeme Bilimi ve Mühendislik Malzemeleri*, Erdoğan, M. (Çev.), Nobel Akademik Yayıncılık.

Aydın, H. (2008). *Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile Birleştirilmiş Yaşlandırılabilir Alüminyum Alaşımlarının Mekanik Özelliklerinin ve Korozyon Davranışlarının İncelenmesi*, Doktora Tezi, Uludağ Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.

Aydın, H. (2014). Relationship between a Bainitic Structure and the Hardness in the Weld Zone of the Friction-Stir Welded X80 Api-Grade Pipe-Line Steel, *Materiali in Tehnologije, Materials and Technology*, *48*(1), 15-22.

Bagheri, B., & Abbasi, M. (2019). Analysis of Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Vibration Welded (FSVW) 5083 Aluminum Alloy Joints: Experimental and Simulation, *Journal of Welding and Joining*, *37*(2), 243-253.

Başar, G. (2016). *Cu-Al Levhaların Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile Birleştirilmesinde Optimum Kaynak Parametrelerinin Belirlenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, İskenderun Teknik Üniversitesi/Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Hatay.

Behnagh, R.A., Shen, N., Abdollahi, M. & Ding, H. (2016). Ultrafine-Grained Surface Layer Formation of Aluminum Alloy 5083 by Friction Stir Processing, *3rd CIRP Conference on Surface Integrity (CIRP CSI), Procedia CIRP 45*, 243-246.

Bilgin, M. (2019). *Alüminyum / Magnezyum (Al / Mg) Malzeme Çiftinin Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile Kaynak Edilebilirliğinin Araştırılması*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi/ Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Binal, A. (2006). *AA 2024-T3 Alüminyum Alaşımının Sürtünme Karıştırma Kaynağında İşlem Parametrelerinin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklere Etkileri*, Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.

Bozu, M. (2007). *Sürtünme Karıştırma Kaynağında Farklı Kaynak Parametrelerinin Deneysel Olarak İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Campanelli, S.L., Casalino, G., Casavola, C., & Moramarco, V. (2013). Analysis and Comparison of Friction Stir Welding and Laser Assisted Friction Stir Welding of Aluminum Alloy, *Materials 2013, 6*, 5923-5941.

Casalino, G., Campanelli, S., & Mortello, M. (2014). Influence of Shoulder Geometry and Coating of the Tool on the Friction Stir Welding of Aluminium Alloy Plates, *Procedia Engineering, 69*, 1541-1548.

Cebeci, T. (2010). *Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile Birleştirilen AA 1050 ve AA 5754-H111 Alüminyum Levhaların Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Celal Bayar Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa.

Chander, M.S., Kumar, P.S. & Devaraju, A.(2018) Influence of Tool Rotational Speed and Pin Profile on Mechanical and Microstructural Characterization of Friction Stir Welded 5083 Aluminium Alloy, *Materials Today: Proceedings, 5*(2) 1, 3518-3523.

Chen, C.M. & Kovacevic, R. (2003). Finite Element Modeling of Friction Stir Welding - Thermal and Thermomechanical Analysis, *International Journal of Machine Tools and Manufacture, 43*(13), 1319-1326.

Chen, Z.W., Pasang, T. & Qi, Y. (2008). Shear Flow and Formation of Nugget Zone during Friction Stir Welding of Aluminium Alloy 5083-O, *Materials Science and Engineering A, 474*(1-2), 312-316.

Chennaiah, M.B., Kumar, K.R. & Sridhar, V. (2021). Influence of Tool Profiles on Similar Al-5083 Alloys using Friction Stir Welding, *Materials Today: Proceedings, 46*(17), 8032-8037.

Choi, D-H., Ahn, B-W. Quesnel, D.J. & Jung, S-B. (2013). Behavior of β Phase (Al_3Mg_2) in AA 5083 during Friction Stir Welding, *Intermetallics, 35*, 120-127.

Colligan, K. (1999). Material Flow Behavior during Friction Stir Welding of Aluminum, *American Welding Society and Welding Research Council, Welding Research Supplements*, July, 229-237.

Çam, G. (2001). Al-Alaşımları İçin Geliştirilen Yeni Kaynak Yöntemleri, *TMMOB Makina Mühendisleri Odası Kaynak Teknolojisi III. Ulusal Kongresi Bildiriler Kitabı*, İstanbul, 19-20 Ekim, 268-277.

Çam, G. (2003). Sürtünme Karıştırma Kaynağındaki Gelişmeler, *TMMOB Makina Mühendisleri Odası Kaynak Teknolojisi IV. Ulusal Kongresi Bildiriler Kitabı*, Kocaeli, 24-25 Ekim, 47-64.

Çam, G. (2005). Sürtünme Karıştırma Kaynağı (SKK); Al-Alaşımları için Geliştirilmiş Yeni Bir Kaynak Teknolojisi, *TMMOB Makina Mühendisleri Odası, Mühendis ve Makina, 46*(541), 30-39.

Çam, G. & Mıstıkoğlu, S. (2014). Recent Developments in Friction Stir Welding of Al-Alloys, *Journal of Materials Engineering and Performance, 23*(6), 1936-1953.

Çam, G. & İpekoğlu, G. (2017). Recent Developments in Joining of Aluminum Alloys, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 91*, 1851-1866.

Çam, G., Javaheri, V. & Heidarzadeh, A. (2022). Advances in FSW and FSSW of Dissimilar Al-Alloy Plates, *Journal of Adhesion Science and Technology, In Press*.

Dalkılıç, S. (2012). Sürtünme Karıştırma Kaynağı ve Havacılık ve Uzay Endüstrisindeki Uygulama Alanları, *Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi, 5*(4), 25-33.

Demirkesen, G., (2010). *Sürtünme Karıştırma Kaynağının Raylı Taşıt İmalatındaki Uygulamasının Araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Dilek, M. (2006). *Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile Birleştirilen Farklı Alüminyum Alaşımlarının Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.

Doğan, S. (2006). *AA 5754-H22 Alüminyum Alaşımının Sürtünme Karıştırma Kaynağında İşlem Parametrelerinin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklere Etkileri*, Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.

El-Sayed, M.M., Shash, A.Y. & Abd-Rabou, M. (2018). Finite Element Modeling of Aluminum Alloy AA5083-O Friction Stir Welding Process, *Journal of Materials Processing Technology, 252*, 13-24.

Emiralioğlu, A. (2017). *Farklı Alüminyum Alaşımlarının Sürtünme Karıştırma Kaynağında Kaynak Parametrelerinin Kaynak Edilebilirliğe Etkisi*, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.

Eren, T. (2005). *AA 6063-T6 Borularının Sürtünme Karıştırma Kaynağı Yöntemiyle Kaynak Edilebilirliğinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.

Ericsson, M. & Sandström, R. (2003). Influence of Welding Speed on the Fatigue of Friction Stir Welds, and Comparison with MIG And TIG, *International Journal of Fatigue, 25*(12), 1379-1387.

Fayaz, A.M., Noor, Z.K., Arshad, N.S. & Saad, P. (2022). Friction based solid state welding – A review, *Materials Today: Proceedings, In Press*.

Fraser, K.A., St-Georges, L. & Kiss, L.I. (2014). Optimization of Friction Stir Welding Tool Advance Speed via Monte-Carlo Simulation of the Friction Stir Welding Process Parameters, *Materials 2014, 7*, 3435-3452.

Güçlüer, S. (2007). *Sürtünme Karıştırma Kaynağı Yöntemiyle Alın Kaynağı Yapılmış Al-5086 H32 Levhaların Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Mustafa Kemal Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü, Hatay.

Han, M-S., Lee, S-J., Park, J-C., Ko, S.-C., Woo, Y-B. & Kim, S-J. (2009). Optimum Condition by Mechanical Characteristic Evaluation in Friction Stir Welding for 5083-O Al Alloy, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 19*(1), 17-22.

Hassan, A.M., Qasim, T. & Ghaithan, A. (2012). Effect of Pin Profile on Friction Stir Welded Aluminum Matrix Composites, *Materials and Manufacturing Processes, 27*, 1397-1401.

He, X., Gu, F. & Ball, A. (2014). A Review of Numerical Analysis of Friction Stir Welding, *Progress in Materials Science, 65*, 1-66.

Heidarzadeh, A., Mironov, S., Kaibyshev, R., Çam, G., Simar, A., Gerlich, A., Khodabakhshi, F., Mostafaei, A., Field, D.P., Robson, J.D., Deschamps, A. & Withers, P.J. (2021). Friction Stir Welding/Processing of Metals and Alloys: A Comprehensive Review on Microstructural Evolution, *Progress in Materials Science, 117*, 100752.

Hirata, T., Oguri, T., Hagino, H., Tanaka, T., Chung, S.W., Takigawa, Y. & Higashi, K. (2007). Influence of Friction Stir Welding Parameters on Grain Size and Formability in 5083 Aluminum Alloy, *Materials and Engineering A, 456*(1-2), 344-349.

Huang, K-T., Lui, T-S. & Chen, L-H. (2011). Effect of Microstructural Feature on the Tensile Properties and Vibration Fracture Resistance of Friction Stirred 5083 Alloy, *Journal of Alloys and Compounds, 509*(27), 7466-7472.

İnce, İ. (2011). *Demir Esaslı Malzemelerin Sürtünme-Karıştırma Kaynağında Kaynak Parametrelerinin Dikiş Özelliklerine Etkisi*, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Jacquin, D. & Guillemot, G. (2021). A Review of Microstructural Changes Occurring during FSW in Aluminium Alloys and their Modelling, *Journal of Materials Processing Technology, 288*, 116706.

James, M.N., Hattingh, D.G. & Bradley, G. (2003). Weld Tool Travel Speed Effects on Fatigue Life of Friction Stir Welds in 5083 Aluminium, *International Journal of Fatigue, 25*(12), 1389-1398.

Jesus, J.S., Gruppelaar, M., Costa, J.M., Loureiro, A. & Ferreira, J.A.M. (2016). Effect of Geometrical Parameters on Friction Stir Welding of AA 5083-H111 T-joints, *Procedia Structural Integrity, 1*, 242-248.

Kafalı, H. (2009). *AA 2024 Al Alaşımının Sürtünme Karıştırma Kaynağında (SKK) Kaynak Parametrelerinin Birleşmeye Etkilerinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Kafalı, H. (2011). *Sürtünme Karıştırma Kaynağıyla Birleştirilmiş Al 6013-T6 Alaşımının Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi*, Doktora Tezi, Anadolu Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.

Kallee, S.W., Thomas, W.M. & Nicholas, E.D. (2006). Friction Stir Welding of Lightweight Materials, *Magnesium Alloys and their Applications*, 173-190.

Kaptan, K. (2008). *Sürtünme Karıştırma Kaynağı Birleştirmelerinde Farklı Karıştırıcı Uç Formlarının Birleştirme Kalitesine Etkilerinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Kashaev, N., Ventzke, V. & Çam, G. (2018). Prospects of Laser Beam Welding and Friction Stir Welding Processes for Aluminum Airframe Structural Applications, *Journal of Manufacturing Processes, 36*, 571-600.

Karamış, M.B. (2016). *İmalat Yöntemleri*, Netform Matbaacılık, Kayseri

Khan, N.Z., Siddiquee, A.N., Khan, Z.A. & Shihab, S.K. (2015). Investigations on Tunneling and Kissing Bond Defects in FSW Joints for Dissimilar Aluminum Alloys, *Journal of Alloys and Compounds, 648*, 360-367.

Kim, S., Lee, C.G. & Kim, S-J. (2008). Fatigue Crack Propagation Behavior of Friction Stir Welded 5083-H32 and 6061-T651 Aluminum Alloys, *Materials and Engineering A, 478*(1-2), 56-64.

Klobcar, D., Kosec, L., Pietras, A. & Smoley, A. (2012). Friction-Stir Welding of Aluminium Alloy 5083, *Materiali in Tehnologije, Materials and Technology, 46*(5), 25-30.

Klobcar, D., Tusek, J., Bizjak, M. & Leser, V. (2014). Micro Friction Stir Welding of Copper Electrical Contacts, *Metalurgija, 53*(4), 509-512.

Kumar, R., Singh, K. & Pandey, S. (2012). Process forces and heat input as function of process parameters in AA5083 friction stir welds, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 22*, 288-298.

Kumar, P S., Shastry, C.S.R. & Devaraju, A. (2017). Influence of Tool Revolving on Mechanical Properties of Friction Stir Welded 5083 Aluminum Alloy, *Materials Today: Proceedings, 4*(2) A, 330-335.

Kumar, S., Mahajan, A., Kumar, S. & Singh, H. (2022). Friction Stir Welding: Types, Merits & Demerits, Applications, Process Variables & Effect of Tool Pin Profile, *Materials Today: Proceedings, 56*(5), 3051-3057.

Küçükömeroğlu, T., Yılmaz, H. & Aktarer, S.M. (2013). The Effect of Tool Press Force to Weldability of AA5754 and AA6061 Alloys with Friction Stir Welding Method, Pamukkale University *Journal of Engineering Sciences, 19*(7), 281-286.

Liu, L., Ren, D. & Liu, F. (2014). A Review of Dissimilar Welding Techniques for Magnesium Alloys to Aluminum Alloys, *Materials 2014, 7*, 3735-3757.

Lombard, H., Hattingh, D.G., Steuwer, A. & James, M.N. (2008). Optimising FSW Process Parameters to Minimise Defects and Maximise Fatigue Life in 5083-H321 Aluminium Alloy, *Engineering Fracture Mechanics, 75*(3-4), 341-354.

Lomolino, S., Tovo, R. & Santos, J.D. (2005). On the Fatigue Behaviour and Design Curves of Friction Stir Butt-Welded Al Alloys, *International Journal of Fatigue, 27*, 305-316.

Malta, D. (2006). *Alüminyum Alaşımı ve Pirinç Levhaların Sürtünme Karıştırma Kaynağı Yöntemiyle Bindirme Kaynağı ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Mustafa Kemal Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü, Hatay.

Malyer, E. (2010). *Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile Birleştirilen 5000 Serisi Alüminyum Alaşımlarında Kaynak Parametrelerinin İncelenmesi*, Doktora Tezi, Uludağ Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.

Mert, Ş. & Kaluç, E. (2003). Sürtünme Karıştırma Kaynağında Kullanılan Takımlardaki Gelişmeler, *TMMOB Makina Mühendisleri Odası Kaynak Teknolojisi IV. Ulusal Kongresi Bildiriler Kitabı, Kocaeli*, 24-25 Ekim, 103-116.

Mijajlovic, M.M., Pavlovic, N.T., Jovanovic, S.V., Jovanovic, D.S. & Milcic, M.D. (2012). Experimental Studies of Parameters Affecting the Heat Generation in Friction Stir Welding Process, *Thermal Science, 16*(2), 351-362.

Mishra, R.S. & Ma, Z.Y. (2005). Friction Stir Welding and Processing, *Materials Science and Engineering, 50*(1-2), 1-78.

Nicholas E.D. (1991). *TWI Bulletin 6*, (32), 124-127.

Niu, P.L., Li, W.Y. & Chen, D.L. (2021). Tensile and Cyclic Deformation Response of Friction-Stir-Welded Dissimilar Aluminum Alloy Joints: Strain Localization Effect, *Journal of Materials Science & Technology, 73*(2021), 91-100.

Nourani, M., Milani, A.S., Yannacopoulos, S. & Yan, C. (2014). An Integrated Multiphysics Model for Friction Stir Welding of 6061 Aluminum Alloy, *International Journal of Multiphysics, 8*(1), 29-48.

Öcalır, Ş. (2009). *Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile Yapılan Alüminyum Alaşımı Birleştirmelerde Optimum Parametrelerin Belirlenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Mersin Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü, Mersin.

Öcalır, Ş. (2019). *Farklı İki Malzemenin Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile Birleştirilmesinde Kaynak Parametrelerinin Bağlantının Mekanik Özelliklerine ve Korozyon Direncine Etkilerinin İncelenmesi*, Doktora Tezi, Tarsus Üniversitesi/Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Mersin.

Özarpa, C. (2005). *Al 2024-O ve 5754-H22 Alüminyum Alaşımlarının Sürtünme Karıştırma Kaynağı*, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.

Özel, K., Şahin, M. & Akdoğan, A. (2008). Mechanical and Metallurgical Properties of Aluminium and Copper Sheets Joined by Cold Pressure Welding, *Strojniski Vestnik - Journal of Mechanical Engineering, 54*(11), 796-806.

Özel, K. (2012). An Investigation on Friction Stir Welding of Aluminum Alloys, *IMEF 2012, 5th International Mechanical Engineering Forum*, Prague, Czech Republic, June 20-22, 743-753.

Özel, K., Çetinarslan, C.S. & Şahin, M. (2017). Mechanical Properties of Friction Stir Welded 5083 Aluminum Alloys, *Materials Testing, 59*(1), 64-68.

Paik, J.K. (2009). Mechanical Properties of Friction Stir Welded Aluminum Alloys 5083 and 5383, *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 1*(1), 39-49.

Peel, M., Steuwer, A., Preuss, M. & Withers, P.J. (2003). Microstructure, Mechanical Properties and Residual Stresses as a Function of Welding Speed in Aluminum AA 5083 Friction Stir Welds, *Acta Materialia, 51*(16), 4791-4801.

Prabha, K.A., Putha, P.K. & Prasad, B.S. (2018). Effect of Tool Rotational Speed on Mechanical Properties Of Aluminium Alloy 5083 Weldments in Friction Stir Welding, *Materials Today: Proceedings, 5*(9) 3, 18535-18543.

Rao, D., Huber, K., Heerens, J., dos Santos, J.F. & Huber, N. (2013). Asymmetric Mechanical Properties and Tensile Behaviour Prediction of Aluminium Alloy 5083 Friction Stir Welding Joints, *Materials and Engineering A, 565*, 44-50.

Raweni, A., Majstorovic, V., Sedmak, A., Tadic, S. & Kirin, S. (2018). Optimization of AA5083 Friction Stir Welding Parameters Using Taguchi Method, *Tehnicki Vjesnik, 25*(3), 861-866.

Sahu, M., Paul, A. & Ganguly, S. (2021). Optimization of Process Parameters of Friction Stir Welded Joints of Marine Grade AA 5083, *Materials Today: Proceedings, 44*(2), 2957-2962.

Saravanakumar, R. & Rajasekaran, T. (2022). Infuence of Pin Profile on Microstructure and Mechanical Properties of Armour Grade AA5083 Friction Stir Welding Butt Joints, *Welding in the World, 66*, 907-921.

Sayaca, T. (2010). *Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile Birleştirilen 2000 Serisi Alüminyum Alaşımlarının Yorulma Davranışının İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.

Sayer, S. (2007). *AA 6063 (AlMgSi0.5) Tipi Alüminyum Malzemelerin Sürtünme Karıştırma Kaynağında Kaynak Değişkenlerinin, Bağlantının Dayanımı ve Mikroyapı Özellikleri Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması*, Doktora Tezi, Ege Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.

Serindağ, H.T. (2014). *Sonlu Elemanlar Yöntemi Kullanılarak Sürtünme Karıştırma Kaynağının Modellenmesi*, Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.

Shanavas, S., Dhas, J.E.R. & Murugan, N. (2018). Weldability of Marine Grade AA 5052 Aluminum Alloy by Underwater Friction Stir Welding, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 95*, 4535-4546.

Singh, V.P., Patel, S.K. & Kuriachen, B. (2021). Mechanical and Microstructural Properties Evolutions of Various Alloys Welded Through Cooling Assisted Friction-Stir Welding: A Review, *Intermetallics, 133*, 107122.

Sivaraman, A., Manikandan, G. & Santhosh, S. (2020). Preliminary Experimental Evaluation of Friction Stir Welding of Dissimilar Aluminium Alloys, *International Journal of Aquatic Science, 11*(1), 188-192.

Smith, W.F. (2001). *Malzeme Bilimi ve Mühendisliği*, Kınıkoğlu, N. (Çev.), Literatür Yayıncılık.

Sun, Y., Gong, W., Feng, J., Lu., G., Zhu. R. & Li, Y. (2022). A Review of the Friction Stir Welding of Dissimilar Materials between Aluminum Alloys and Copper, *M*etals. *12*(4), 675.

Şanseven, H.G. (2019). *Alüminyum Alaşımlarının Sürtünme Karıştırma Kaynağında Kaynak Parametrelerinin Dikiş Kalitesine Etkileri*, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Şık, A. & Kayabaş, Ö. (2003). Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile Yapılan Alüminyum Kaynağında Kaynak Bölgesinin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, *Gazi Üniversitesi Endüstriyel Sanatlar Eğitim Fakültesi Dergisi, 11*(12), 30-43.

Tanrıöver, L. (2008). *AA 5052/2024 Alaşımlarının Sürtünme Karıştırma Kaynağı Yöntemiyle Birleştirilebilirliğinin Araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

Thomas, W.M., Nicholas, E.D., Needham, J.C., Murch, M.G., Temple-Smith, P. & Dawes, C.J. (1991). Friction-stir butt welding, GB Patent No. 9125978.8, *International patent application No. PCT/GB92/02203*.

Thomas, W.M. & Nicholas, E.D. (1997). Friction Stir Welding for Transportation Industries, *Materials & Design, 18*, 269-273.

Thomas, W.M., Nicholas, E.D., Watts, E.R. & Staines, D.G. (2002). Friction Based Welding Technology for Aluminium, *Mater. Sci. Forum, 396-402*(3), 1543-1548.

Thomas, W.M., Martin, J. & Wiesner, C.S. (2010). Discovery Invention and Innovation of Friction Technologies for the Aluminium Industries, *INALCO 2010, 11th International Aluminium Conference*, Eindhoven, Netherlands, June 23-25.

Trukhanov, K., Zybin, I., Bilenko, A. & Tsarkov, A. (2021). Optimization of Parameters for Friction Stir Batt-Lap Welding of AA 5083 Alloy, *Materials Today: Proceedings, 38*(4), 1644-1647.

Tsarkov, A., Trukhanov, K., Zybin, I. & Vichniakov, A. (2022). Tilt Angle Effect on Friction Stir Welding Conditions. *In Key Engineering Materials, 910*, 115-122.

Tunç Önol, A. (2010). *Microstructural Characterization and Mechanical Property Determination of Overlap Friction Stir Welding of Aluminum and Copper*, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.

Verma, S., Kumar, V., Kumar, R. & Sidhu, R.S. (2022). Exploring the Application Domain of Friction Stir Welding in Aluminum and Other Alloys, *Materials Today: Proceedings, 50*(5), 1032-1042.

Vijayan, S., Raju, R. & Rao, S.R.K. (2010). Multiobjective Optimization of Friction Stir Welding Process Parameters on Aluminum Alloy AA 5083 Using Taguchi-Based Grey Relation Analysis, *Materials and Manufacturing Processes, 25*, 1206-1212.

Xu, Z., Li, Z., Ji, S. & Zhang, L. (2018). Refill Friction Stir Spot Welding of 5083-O Aluminum Alloy, *Journal of Materials Science & Technology, 34*(5), 878-885.

Yazdipour, A., Shafiei, A. & Dehghani, M.K. (2009). Modeling the Microstructural Evolution and Effect of Cooling Rate on the Nanograins Formed During the Friction Stir Processing of Al5083, *Materials Science and Engineering: A, 527*(1-2), 192-197.

Yıldırım, M.T. (2010). *Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile Birleştirilen 3000 Serisi Alüminyum Alaşımların Yorulma Davranışının İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.

Yılmaz, S. S., Ünlü, B. S., Uzkut, M. & Ertürk, D. (2016). Alüminyum Alaşımlarında Sürtünme Karıştırma Kaynağı ve Uygulamaları, *TMMOB Makina Mühendisleri Odası, Mühendis ve Makina, 57*(676), 56-63.

Zeytin, H.K. (2000). Otomotiv Endüstrisinde Alüminyum Kullanımı, *10. Uluslararası Metalurji- Malzeme Kongresi Bildiriler Kitabı*, İstanbul, 77-84.

Zhang, H. & Liu, H. (2013). Mathematical Model and Optimization for Underwater Friction Stir Welding of a Heat-Treatable Aluminum Alloy, *Materials & Design, 45*, 206-211.

Zhou, C., Yang, X. & Luan, G. (2005). Fatigue Properties of Friction Stir Welds in Al 5083 Alloy, *Scripta Materialia, 53*(10), 1187-1191.

http://www.twi-global.com

Gülmez, T., Malzemelerin Mekanik Davranışı [PDF belgesi] Online Web Site: 04 Ocak 2022 tarihinde https://web.itu.edu.tr/gulmezt/MekanikD.html adresinden erişildi.

ÖZGEÇMİŞ

Kaan ÖZEL, İlk ve ortaöğrenimini Edirne'de tamamladıktan sonra 2000 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Makina Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü'nden lisans derecesi ile mezun olmuştur. 2002 yılı Şubat ayında Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başlamış ve 2005 yılı Şubat ayında mezun olmuştur. 2002 yılı Ekim ayından itibaren Trakya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü'nde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaya başlayan Kaan ÖZEL, 2009 yılından itibaren Uzman, 2018 yılından itibaren Öğretim Görevlisi olarak akademik hayatına devam etmektedir. Evli ve bir çocuk babası olup İngilizce bilmektedir.

TEZ İLE İLGİLİ BİLİMSEL FAALİYETLER

Özel, K., Çetinarslan, C.S., & Şahin, M. (2017). Mechanical Properties of Friction Stir Welded 5083 Aluminum Alloys, *Materials Testing, 59*(1), 64-68.

Özel, K. & Çetinarslan, C.S. (2017), A Statistical Analysis for Aluminum Alloys Joined with Friction Stir Welding, *ICAME 2017, 3rd International Conference on Advances in Mechanical Engineering*, Istanbul, Turkey, December 19-21, 948-955.

Özel, K. & Çetinarslan, C.S. (2017), Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile Birleştirilmiş Alüminyum Alaşımlarının Mekanik Özelliklerinin İstatistiksel olarak İncelenmesi, *X. Kaynak Teknolojisi Ulusal Kongre ve Sergisi*, Ankara, 17-18 Kasım, 111-118.

Özel K. & Çetinarslan C.S. (2016), Metallurgical Investigation of Friction Stir Welded Aluminum Alloys, *ICAT 2016, 4th International Conference on Advanced Technology and Sciences*, Rome, Italy, November 23-25, 302-305.

Özel K. & Çetinarslan C.S. (2015), An Experimental Investigation of Non-Traditional Welding Methods for Aluminum Alloys, *SMST 2015, International Conference on Sustainable Materials Science and Technology*, Paris, France, July 15-17.

Özel K., Çetinarslan C.S. & Karaman Genç S. (2014), Joining of Aluminum Alloys with Friction Stir Welding Method, *COMAT 2014, 3rd International Conference on Recent Trends in Structural Materials*, Pilsen, Czech Republic, November 19-21.

Özel, K. (2012), An Investigation on Friction Stir Welding of Aluminum Alloys, *IMEF 2012, 5th International Mechanical Engineering Forum*, Prague, Czech Republic, June 20-22, 743-753.

Özel, K. & Şahin, M. (2008), Friction Stir Welding and its Application to Aluminum Materials, *UNITECH 2008, International Scientific Conference, Gabrovo, Bulgaria, Vol. 2*, November 21-22, 158-164.

Özel, K. & Şahin, M. (2007), Sürtünme Karıştırma Kaynağı ve Yeni Uygulama Alanları, *IV. Demir-Çelik Kongresi ve Sergisi*, Karabük, 01-03 Kasım, 225-230.