KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

LAZER VE KUMLAMA YÖNTEMLERİ İLE Ti6Al4V ALAŞIMINDA FONKSİYONEL YÜZEYLERİN OLUŞTURULMASI

YÜKSEK LİSANS

Makina Müh. Zafer YÜCEL

Anabilim Dalı: Makina Mühendisliği

Danışman: Doç. Dr. Tamer SINMAZÇELİK

KOCAELİ, 2008

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

LAZER VE KUMLAMA YÖNTEMLERİ İLE Ti6Al4V ALAŞIMINDA FONKSİYONEL YÜZEYLERİN OLUŞTURULMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Zafer YÜCEL

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 07 Ocak 2008

Tezin Savunulduğu Tarih: 26 Şubat 2008

Tez Danışmanı	Üye	Üye
Doç.Dr. Tamer SINMAZÇELİK	Doç.Dr. Muzaffer ZEREN	Doç.Dr. Özgen Ümit ÇOLAK
(.....)	(.....)	(.....)

KOCAELİ, 2008

ÖNSÖZ

Son 60 yıldan beri önemi giderek artan titanyum, dünyada en çok kullanılan metalik malzemeler arasında alüminyum, demir ve magnezyumdan sonra dördüncü sırada yer almaktadır. Klasik hafif metal olarak bilinen alüminyumun iki katı, demir ve nikelin ise yarı özgül ağırlığına sahiptir.

Titanyum ve alaşımları havacılık endüstrisi, kimyasal tesisler ve prosesler, denizcilik ve kıyı ötesi uygulamalar, savunma sanayi, mimari, takı ve süs eşyası üretimi gibi birçok alanda kullanılmaktadır. 1960'lardan itibaren yüksek korozyon dayanımı ve biyolojik uyumluluğu nedeniyle biyomedikal alanda ve dişçilikte de yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Titanyum ve titanyum alaşımları yüksek mukavemet, korozyon direnci ve düşük ağırlık gibi özellikleri bünyesinde bir arada barındıran önemli mühendislik malzemeleridir.

Pek çok uygulamada titanyum malzemenin yüzey özelliklerinin belirli standartlarda olması istenmektedir. Yapıştırma bağlantıları ve vücut içi uygulamalarda yüzeyin istenilen büyüklük ve formda pürüzlü olması avantaj sağlamaktadır. Diğer yandan malzemenin tribolojik özelliklerinin yeterince iyi olmaması nedeniyle istenen yüzey özelliklerini elde etmek üzere çeşitli işlemlerin uygulanması söz konusudur. Bu çalışmada Ti6Al4V alaşımının ısıl işlemler sonrası oluşan mikro yapısal değişimleri ve bunun yüzey özelliklerine olan etkileri incelenmiştir. Kumlama yapılan ısıl işlemli ve işlemsiz malzemelerde elde edilen pürüzlük değerleri ve yüzey topografyaları incelenmiştir. Ayrıca Nd:YAG lazer yardımıyla yüzeyde lazer-gaz nitrürleme işleminin uygulanması ile yüzeyde elde edilen titanyum oksit ve titanyum nitrür içerikli tabakanın tribolojik özellikleri incelenmiştir.

Bu çalışmanın ortaya çıkmasında büyük emeği olan, bana kılavuzluk eden, bilgi birikimi ve tecrübesiyle yardımlarını esirgemeyen sayın danışmanım Doç. Dr. Tamer SINMAZÇELİK'e geleceğe yönelik kazandırdığı bilimsel bakış açısı için sonsuz şükran ve teşekkürlerimi sunarım.

TÜBİTAK-MAM, Malzeme Enstitüsünce yürütülmekte olan 5045806 nolu DPT destekli "Titanyum hassas döküm" başlıklı proje kapsamında çalışmalarımı gerçekleştirmeme imkan sağladıkları için Malzeme Enstitüsü yöneticileri Doç. Dr. Tarık BAYKARA ve Doç. Dr. Volkan GÜNAY'a, proje yürütücüsü Batu BÜTÜN bey'e, proje arkadaşım malzeme mühendisi Eyüp AKAGÜNDÜZ ve tüm enstitü çalışanlarına teşekkür ederim.

Tez çalışmalarım kapsamında Lazer işlemlerini gerçekleştirmek üzere Kocaeli Üniversitesi Lazer Teknolojileri Araştırma ve Uygulama Merkezi'nin (LATARUM) imkânlarını kullanmama izin veren Prof. Dr. Arif DEMİR hocama ve merkez çalışanlarına teşekkür ediyorum.

Yüksek lisans çalışmalarım süresince maddi manevi her konuda destek ve yardımlarını esirgemeyen, beni cesaretlendiren aileme teşekkür eder saygılarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ i
İÇİNDEKİLER ii
ŞEKİLLER DİZİNİ iv
TABLOLAR DİZİNİ viii
SİMGELER VE KISALTMALAR ix
ÖZET x
BÖLÜM 1. GİRİŞ 1
BÖLÜM 2. TİTANYUM VE ALAŞIMLARI 3
2.1. Titanyum Malzeme Ve Özellikleri 3
2.2. Üretim Yöntemi ve Teknoloji 6
2.3. Kullanım Alanları 6
2.3.1. Biyomedikal uygulamalarda 8
2.3.2. Havacılık uygulamalarında 11
2.3.3. Titanyum ve alaşımlarının otomotiv uygulamaları 14
2.3.4. Titanyum ve alaşımlarının diğer bazı kullanım alanları 16
2.4. Titanyum Alaşımlarının Özellikleri 17
2.5. Titanyum Alaşımlarının Sınıflandırılması 19
2.5.1. Saf titanyum 19
2.5.2. α titanyum alaşımları 20
2.5.3. α yakın (near-α) titanyum alaşımları 21
2.5.4. α+β titanyum alaşımları 21
2.5.5. β titanyum alaşımları 22
2.6. Titanyum ve Alaşımlarının Isıl İşlemleri 23
BÖLÜM 3. TEKNİK BİLGİLER 25
3.1. Kumlama 25
3.1.1. Yüzey pürüzlülüğü 27
3.1.2. Pürüzlülük parametreleri 28
3.1.3. Pürüzlülük ölçüm cihazları 29
3.2. Isıl İşlem 30
3.3. Lazerler 32
3.3.1. Lazerlerin kullanım alanları 33
3.3.2. Nd: YAG lazer 34
BÖLÜM 4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR 35
4.1. Kumlama Çalışması 35
4.2. Isıl İşlem Çalışması 36
4.3. Lazer-Gaz Nitrürasyon Çalışması 38
BÖLÜM 5. DENEYSEL ÇALIŞMALARIN BULGULARI 43
5.1. Kumlama Çalışması Bulguları 43

5.2. Isıl İşlem Çalışması Bulguları 53
5.2.1. Isıl işlemler sonrası mikroyapıda oluşan değişikler 53
5.2.2. Isıl işlemler sonrası mikro sertlik ölçümleri 78
5.2.3. Isıl işlemler sonrası kumlama ve yüzey pürüzlülük testi sonuçları 80
5.3. Lazer-Gaz Nitrürasyon Çalışması Bulguları 97
BÖLÜM 6. SONUÇLAR 111
6.1. Kumlama 111
6.2. Isıl İşlem 111
6.3. Lazer-Gaz Nitrürleme 112
KAYNAKLAR 113
ÖZGEÇMİŞ 115

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Mukavemet / Yoğunluk oranının Sıcaklıkla değişimi. 4
Şekil 2.2. Dünyadaki titanyum tüketimi oranları. 7
Şekil 2.3. Dokuların titanyum alaşımı ile uyumu. 9
Şekil 2.4. F22 savaş uçağında kullanılan malzemelerin oranları. 12
Şekil 2.5. Motordan beklenenlere bağlı olarak Ti alaşımı cinslerinin kullanım oranı. 13
Şekil 2.6. Alaşım elementlerinin ve saflığı bozan maddelerin titanyumun mekanik nitelikleri üzerine etkisi. (a) Arayer katı eriyikleri oluşturan elementler; (b) Yeralan katı eriyikleri oluşturan elementler. 18
Şekil 3.1. Basınçlı Kumlama Düzeneği. 25
Şekil 3.2. Yüzey topoğrafyası. 28
Şekil 3.3. Yüzey ölçüm tekniklerinin temel kavramları. 28
Şekil 3.4. Ra ortalama pürüzlülük parametresi. 29
Şekil 3.5. Mekanik pürüzlülük ölçme cihazı. 30
Şekil 3.6. Tipik bir Nd-YAG lazerinin kazanç ortamı ve geri besleme (kavite) sistemleri. .. 33
Şekil 3.7. Nd:YAG lazer kovuğu. 34
Şekil 4.1. Açılı kumlama yapılmasını sağlayan düzenek. 36
Şekil 4.2. Kumlamada kullanılan SiO_2 kumunun ışık mikroskobu (a) ve SEM görüntüsü (b). 36
Şekil 4.3. Deneysel çalışmalarda kullanılan Nd:YAG lazer sistemi: 39
Şekil 4.4. Darbeli Nd:YAG lazer ile yapılan lazer-gaz nitrürleme çalışmasında kullanılan düzenek. 40
Şekil 4.5. Numunelere uygulanan lazer darbe şekilleri 40
Şekil 4.6. Numunenin ergime izine dik kesiminin şematik gösterimi. 41
Şekil 4.7. Lazer ergitme ve yüzey çizilme dayanımı testinin (scratch test) şematik gösterimi. 41
Şekil 4.8. Sertlik ölçümlerinin alındığı bölgeler. 42
Şekil 5.1. 1,5 bar basınçta farklı açı değerleri için ağırlık kaybının kumlama süresi ile değişimi. 44
Şekil 5.2. 3 bar basınçta farklı açı değerleri için ağırlık kaybının kumlama süresi ile değişimi. 45
Şekil 5.3. 5 bar basınçta farklı açı değerleri için ağırlık kaybının kumlama süresi ile değişimi. 46
Şekil 5.4. Değişen açının % Si oranına göre değişim grafiği. 47
Şekil 5.5. Değişen açının pürüzlülük değerleri Ra ve Ry 'ye göre değişim grafiği. 47
Şekil 5.6. Orijinal (kumlanmamış) malzeme, a- SEM görüntüsü, b- yüzey pürüzlülük profili. 48
Şekil 5.7. 90 derece açı ile kumlanmış malzeme, a- SEM görüntüsü, b- yüzey pürüzlülük değeri. 49
Şekil 5.8. 15 derece açı ile kumlanmış malzeme, a- SEM görüntüsü, b- yüzey pürüzlülük değeri. 50

Şekil 5.9. 45 derece açı ile kumlanmış malzeme, a- SEM görüntüsü, b- yüzey pürüzlülük değeri. 50
Şekil 5.10. 30 derece açı ile kumlanmış malzeme, a- SEM görüntüsü, b- yüzey pürüzlülük değeri. 51
Şekil 5.11. 60 derece açı ile kumlanmış malzeme, a- SEM görüntüsü, b- yüzey pürüzlülük değeri. 52
Şekil 5.12. 75 derece açı ile kumlanmış malzeme, a- SEM görüntüsü, b- yüzey pürüzlülük değeri. 52
Şekil 5.13. Ti - % 6 Al faz diyagramı ile Ti6Al4V alaşımında meydana gelen değişiklikler.53
Şekil 5.14. Isıl işlemsiz numunenin optik mikroyapı görüntüsü. 54
Şekil 5.15. Isıl işlemsiz numunenin XRD sonucu. 54
Şekil 5.16. Isıl işlemsiz orijinal numunede oluşan çizilme izinin (a) optik ve (b) SEM görüntüsü. 55
Şekil 5.17. Isıl işlemsiz orijinal numunenin yüzey çizilme dayanımı testi sonuçları 55
Şekil 5.18. Numune 1'in optik mikroyapı görüntüsü. 56
Şekil 5.19. Numune 1'in XRD sonucu. 56
Şekil 5.20. Numune 1'de oluşan çizilme izinin (a) optik ve (b) SEM görüntüsü. 57
Şekil 5.21. Numune 1'in yüzey çizilme dayanımı testi sonuçları 57
Şekil 5.22. Numune 2'in optik mikroyapı görüntüsü. 58
Şekil 5.23. Numune 2'nin XRD sonucu 59
Şekil 5.24. Numune 2'de oluşan çizilme izinin (a) optik ve (b) SEM görüntüsü. 59
Şekil 5.25. Numune 2'nin yüzey çizilme dayanımı testi sonuçları 60
Şekil 5.26. Numune 3'in optik mikroyapı görüntüsü. 61
Şekil 5.27. Numune 3'ün XRD sonucu. 61
Şekil 5.28. Numune 3'de oluşan çizilme izinin (a) optik ve (b) SEM görüntüsü. 62
Şekil 5.29. Numune 3'ün yüzey çizilme dayanımı testi sonuçları 62
Şekil 5.30. Numune 4'ün optik mikroyapı görüntüsü. 63
Şekil 5.31. Numune 4'ün XRD sonucu. 63
Şekil 5.32. Numune 4'de oluşan çizilme izinin (a) optik ve (b) SEM görüntüsü. 64
Şekil 5.33. Numune 4'ün yüzey çizilme dayanımı testi sonuçları 64
Şekil 5.34. Numune 5'in optik mikroyapı görüntüsü. 65
Şekil 5.35. Numune 5'in XRD sonucu. 66
Şekil 5.36. Numune 5'de oluşan çizilme izinin (a) optik ve (b) SEM görüntüsü. 66
Şekil 5.37. Numune 5 in yüzey çizilme dayanımı testi sonuçları 67
Şekil 5.38. Numune 6'in optik mikroyapı görüntüsü. 68
Şekil 5.39. Numune 6'nın XRD sonucu. 68
Şekil 5.40. Numune 6'da oluşan çizilme izinin (a) optik ve (b) SEM görüntüsü. 69
Şekil 5.41. Numune 6'nın yüzey çizilme dayanımı testi sonuçları 69
Şekil 5.42. Numune 7'in optik mikroyapı görüntüsü. 70
Şekil 5.43. Numune 7'nin XRD sonucu. 70
Şekil 5.44. Numune 7'de oluşan çizilme izinin (a) optik ve (b) SEM görüntüsü. 71
Şekil 5.45. Numune 7'nin yüzey çizilme dayanımı testi sonuçları 71
Şekil 5.46. Numune 8'in optik mikroyapı görüntüsü. 72
Şekil 5.47. Numune 8'in XRD sonucu. 73
Şekil 5.48. Numune 8'de oluşan çizilme izinin (a) optik ve (b) SEM görüntüsü. 73
Şekil 5.49. Numune 8'in yüzey çizilme dayanımı testi sonuçları 74
Şekil 5.50. Numune 9'un optik mikroyapı görüntüsü. 75

Şekil 5.51. Numune 9'un XRD sonucu..... 75
Şekil 5.52. Numune 9'da oluşan çizilme izinin (a) optik ve (b) SEM görüntüsü. 76
Şekil 5.53. Numune 9'un yüzey çizilme dayanımı testi sonuçları 76
Şekil 5.54. Numunelerin sürtünme katsayısı grafiği ve çizilme izlerinin karşılaştırılması.... 77
Şekil 5.55. Scratch test sonucu oluşan çizilme izi kalınlıkları. 78
Şekil 5.56. Numunelerin Vickers mikrosertlik değerleri grafiği..... 79
Şekil 5.57. Scratch test sonucu ölçülen sürtünme katsayısı değerleri. 80
Şekil 5.58. 15 derece kumlamada ısıl işlem türüne göre her basınç değeri için ağırlık kaybı farkları..... 81
Şekil 5.59. Isıl işlem yapılmamış numunenin 15 derece açı ile 4 bar kumlama bulguları. 500 büyütme (a) ve 2000 büyütmede (b) SEM görüntüleri, yüzey pürüzlülük grafiği (c), EDS analizi (d). 82
Şekil 5.60. Numune 1 'in 15 derece açı ile 4 bar kumlama bulguları. 500 büyütme (a) ve 2000 büyütmede (b) SEM görüntüleri, yüzey pürüzlülük grafiği (c), EDS analizi (d)..... 82
Şekil 5.61. Numune 2 'nin 15 derece açı ile 4 bar kumlama bulguları. 500 büyütme (a) ve 2000 büyütmede (b) SEM görüntüleri, yüzey pürüzlülük grafiği (c), EDS analizi (d)..... 83
Şekil 5.62. Numune 3 'ün 15 derece açı ile 4 bar kumlama bulguları. 500 büyütme (a) ve 2000 büyütmede (b) SEM görüntüleri, yüzey pürüzlülük grafiği (c), EDS analizi (d)..... 84
Şekil 5.63. 45 derece kumlamada ısıl işlem türüne göre her basınç değeri için ağırlık kaybı farkları..... 86
Şekil 5.64. Isıl işlem yapılmamış numunenin 45 derece açı ile 4 bar kumlama bulguları. 500 büyütme (a) ve 2000 büyütmede (b) SEM görüntüleri, yüzey pürüzlülük grafiği (c), EDS analizi (d). 87
Şekil 5.65. Numune 1 'in 45 derece açı ile 4 bar kumlama bulguları. 500 büyütme (a) ve 2000 büyütmede (b) SEM görüntüleri, yüzey pürüzlülük grafiği (c), EDS analizi (d)..... 87
Şekil 5.66. Numune 2 'nin 45 derece açı ile 4 bar kumlama bulguları. 500 büyütme (a) ve 2000 büyütmede (b) SEM görüntüleri, yüzey pürüzlülük grafiği (c), EDS analizi (d)..... 88
Şekil 5.67. Numune 3 'ün 15 derece açı ile 4 bar kumlama bulguları. 500 büyütme (a) ve 2000 büyütmede (b) SEM görüntüleri, yüzey pürüzlülük grafiği (c), EDS analizi (d)..... 89
Şekil 5.68. 90 derece kumlamada ısıl işlem türüne göre her basınç değeri için ağırlık kaybı farkları..... 91
Şekil 5.69. Isıl işlem yapılmamış numunenin 90 derece açı ile 4 bar kumlama bulguları. 500 büyütme (a) ve 2000 büyütmede (b) SEM görüntüleri, yüzey pürüzlülük grafiği (c), EDS analizi (d). 92
Şekil 5.70. Numune 1 'in 90 derece açı ile 4 bar kumlama bulguları. 500 büyütme (a) ve 2000 büyütmede (b) SEM görüntüleri, yüzey pürüzlülük grafiği (c), EDS analizi (d)..... 92
Şekil 5.71. Numune 2 'nin 90 derece açı ile 4 bar kumlama bulguları. 500 büyütme (a) ve 2000 büyütmede (b) SEM görüntüleri, yüzey pürüzlülük grafiği (c), EDS analizi (d)..... 93
Şekil 5.72. Numune 3 'ün 90 derece açı ile 4 bar kumlama bulguları. 500 büyütme (a) ve 2000 büyütmede (b) SEM görüntüleri, yüzey pürüzlülük grafiği (c), EDS analizi (d)..... 94
Şekil 5.73. Isıl işlemli numunelerde ortalama pürüzlülük değerinin değişen kumlama açısına göre değişimi..... 95
Şekil 5.74. Isıl işlemli numunelerde max. pürüzlülük yüksekliğinin değişen kumlama açısına göre değişimi..... 96
Şekil 5.75. Isıl işlemli numunelerde saplanan kum ağırlığı değerinin değişen kumlama açısına göre değişimi..... 96
Şekil 5.76. Numunelere uygulanan lazer darbe şekilleri..... 97

Şekil 5.77. 20 Hz'de lazer işlenmiş bölgelerin üstten görünüşleri. a-A20, b-B20, c-C20. ... 98
Şekil 5.78. 100 Hz'de lazer işlenmiş bölgelerin üstten görünüşleri. a-A100, b-B100, c-C100. 99
Şekil 5.79. 20 Hz'de lazer işlenmiş bölgelerin enine kesitleri. a-A20, b-B20, c-C20 100
Şekil 5.80. 100 Hz'de lazer işlenmiş bölgelerin enine kesitleri. a-A100, b-B100, c-C100 100
Şekil 5.81. Lazer işlenmiş bölgelerin ölçüleri..... 101
Şekil 5.82. Her grup için darbe frekansının fonksiyonun lazer işlenmiş bölgelerin genişlik ve derinlikleri..... 102
Şekil 5.83. Lazer işlenmiş bölgede oluşan türbülansların SEM görüntüleri. a-85X b-450X. 105
Şekil 5.84. Lazer-gaz nitrürlenmiş numunenin (A20) SEM görüntüsü görülmektedir..... 105
Şekil 5.85. Lazer-gaz nitrürlenmiş numunenin (C80) SEM görüntüsü görülmektedir..... 105
Şekil 5.86. Nitrürlenmiş bölge, ara bölge ve ısıdan etkilenmiş bölge..... 106
Şekil 5.87. TiN dentritlerinin altında (nitritlenmiş tabaka) 2500 büyütmede ara bölge görülmektedir..... 107
Şekil 5.88. Nitrür tabakaları üzerinden alınan vickers sertliği izleri. a-280X b-800X..... 107
Şekil 5.89. B20 numunesine uygulanan yüzey çizilme direnci testi. 108
Şekil 5.90. A20'nin X ışını analizi..... 109

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 2.1. Titanyum, Alüminyum ve Demir 'in bazı fiziksel özellikleri..... 3
Tablo 2.2. Ti6Al4V alaşımının fiziksel özellikleri ve kimyasal içeriği. 19
Tablo 4.1. Çalışmalarda kullanılan Titanyum alaşımının (Ti6Al4V) elementsel analizi. 35
Tablo 4.2. Titanyum numunelere uygulanan ısıl işlem koşulları. 37
Tablo 4.3. Lazer Teknolojileri Araştırma ve Uygulama Merkezinde (LATARUM) var olan ve deneysel çalışmada kullanılan atımlı Nd:YAG lazerinin teknik özellikleri. 39
Tablo 5.1. 1,5 bar basınç altında yapılan kumlama sonuçları. 43
Tablo 5.2. 3 bar basınç altında yapılan kumlama sonuçları. 44
Tablo 5.3. 5 bar basınç altında yapılan kumlama sonuçları. 45
Tablo 5.4. Ra, Ry ve % Si değerleri..... 47
Tablo 5.5. Numunelerin Vickers mikrosertlik değerleri tablosu..... 79
Tablo 5.6. 15 derece açı ile 2, 3 ve 4 bar basınç altında 30 sn kumlamanın ağırlık ölçümleri. 81
Tablo 5.7. 15 derece açı ve 4 bar ile yapılan kumlamanın ısıl işlem numuneleri yüzeyleri ölçülen % Si miktarı ile Ra ve Ry pürüzlülük değerleri. 85
Tablo 5.8. 45 derece açı ile 2, 3 ve 4 bar basınç altında 30 sn kumlamanın ağırlık ölçümleri. 86
Tablo 5.9. 45 derece açı ve 4 bar ile yapılan kumlamanın ısıl işlem numuneleri yüzeyleri ölçülen % Si miktarı ile Ra ve Ry pürüzlülük değerleri. 90
Tablo 5.10. 90 derece açı ile 2, 3 ve 4 bar basınç altında 30 sn kumlamanın ağırlık ölçümleri. 91
Tablo 5.11. 90 derece açı ve 4 bar ile yapılan kumlamanın ısıl işlem numuneleri yüzeyleri ölçülen % Si miktarı ile Ra ve Ry pürüzlülük değerleri. 95
Tablo 5.12. Lazer-gaz nitrürasyonu parametrelerinin ayrıntıları. 98

SİMGELER VE KISALTMALAR

gr	Gram
HV	Vickers sertliği
Hz	Hertz
j	Joule
ms	Mili saniye
nm	Nano Metre
Ra	Ortalama Pürüzlülük
Ry	Maksimum Pürüzlülük Yüksekliği
sn	Saniye
W	Watt
µm	Mikrometre
%Si	Ağırlıkça Yüzde Silisyum Miktarı

Kısaltmalar

ASM	American Society for Metals
CP	Saf Titanyum
EDS	Elektron Difraksiyon Spektrometresi
HMK	Hacim Merkez Kübik
IEB	Isıdan Etkilenmiş Bölge
LATARUM	Lazer Teknolojileri Araştırma ve Uygulama Merkezi
Nd:YAG	Neodymium-Doped Yttrium Aluminium Garnet
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
SME	Shape Memory Effect (Şekil Hafıza Etkisi)
SPH	Sıkı Paket Hekzagonal
XRF	X-Ray Floresan Spektrometre
XRD	X-Ray Difraksiyonu
YMK	Yüzey Merkez Kübik

LAZER VE KUMLAMA YÖNTEMLERİ İLE Ti6Al4V ALAŞIMINDA FONKSİYONEL YÜZEYLERİN OLUŞTURULMASI

Zafer YÜCEL

Anahtar kelimeler: Ti6Al4V alaşımı, kumlama, ısıl işlem, Nd:YAG lazer-gaz nitrürleme

Ti6Al4V alaşımı, yüksek dayanım/ağırlık oranına sahip, biyo-uyumlu, korozyon dayanımı yüksek olan ve bu nedenlerle havacılık, kimya ve medikal uygulamalar başta olmak üzere pek çok sektörde tercih edilen bir malzemedir. Havacılık uygulamalarında titanyum-titanyum ve titanyum-kompozit malzeme çiftlerinin yapıştırmalı bağlantılarla birleştirilmeleri öncesi titanyum yüzeylerinin pürüzlendirilmesinin performansı arttırdığı bilinmektedir. Diğer yandan vücut içerisinde kullanılan implantların yüzeyinde kemik oluşumunun (osseointegrasyon) hızlanması için de yüzeyin pürüzlü olmasının avantajlı olduğu bilinmektedir. Pek çok uygulamada titanyum alaşımlarının belirli yüzey özelliklerine sahip olmaları istenmektedir.

Bu çalışmanın ilk kısmında; yüzeyi pürüzlendirmek üzere çeşitli püskürtme basıncı, çeşitli açı ve süreler uygulanarak kumlama yapılan Ti6Al4V malzemelerde oluşan pürüzlüklerin, yüzey deformasyonlarının karakterize edilmeleri gerçekleştirilmiştir. Kumlama sonrası elde edilen yüzeylerin pürüzlük değerleri ile yüzey morfolojileri ilişkilendirilmiştir.

İkinci kısmında; yüzey özelliklerini iyileştirmek üzere malzemelere uygulanan ısıl işlemler sonrası malzemede oluşan mikroyapılar incelenmiş, malzemede değişen yüzey çizilme dayanımları ve kumlama sonrası elde edilen yüzey pürüzlülükleri ölçülmüştür.

Çalışmanın son kısmında; yüksek enerjili Nd:YAG lazer, yüzey çatlağı içermeyen TiO_2 ve TiN tabakaları oluşturup, yüzeysel olarak ergitilmiş bölgeler elde etmek amacıyla kullanılmıştır. Ayrıca bu kısımda numunelerde Nd:YAG yüzey ergitme parametrelerinin planlanan test programına göre değiştirilmesiyle Ti6Al4V alaşımının yüzeyinde oluşan yapıların morfolojisi ve boyutları incelenmiştir.

CREATING OF FUNCTIONAL SURFACES IN TI6AL4V ALLOY BY USING LASER AND SAND BLASTING TECHNIQUES

Zafer YÜCEL

Key Words: Ti6Al4V alloy, sand blasting, heat treatment, Nd:YAG laser gas nitruration

Ti6Al4V alloy is a popular material which is often preferred primarily in aerospace, chemistry and medical applications because of it is high strength/weigh ratio, high corrosion resistance and bio-compatible properties. In aerospace applications, it is already known that surface roughening before joining material couples of Ti-Ti and Ti-composites via adhesive bondings increases the performance of the joints. Additionally, surface roughening of implants which are used in human body for medical applications accelerates bone formation (osseointegration) on implant surfaces. In many applications Ti alloys must have a certain surface properties.

In the first part of this study; sand blasted surface roughness of Ti6Al4V surfaces under various pressure and impingement angles are characterized. After sand blasting surface roughness and achieved surface deformations, and surface morphology of the materials were investigated.

In the second part; in order to improve surface properties, achieved microstructures after heat treatments, surface properties, scratch resistance and surface roughnesses are measured.

In last part of this study; a high power pulsed Nd-YAG laser was used to obtain lenticular shaped treated zone with created TiO_2 and TiN layers without any surface cracks. Furthermore in this part; it is also investigated what happens on characteristic behaviors of the alloy Ti6Al4V due to created melt profile on the samples when process parameters of Nd-YAG Laser are changed with respect to planned test program.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Titanyum ve alaşımları 1952 yılından beri kullanımda olan nispeten yeni mühendislik malzemeleridir. Titanyum alaşımlarının yüksek dayanım/ağırlık oranı ve yüksek sıcaklık özellikleri uçak endüstrisinde çok büyük öneme sahiptir. Titanyumun mükemmel korozyon direnci bu metali kimya, yiyecek endüstrileri ve biyomedikal alanda kullanışlı hale getirmiştir. Titanyum ve alaşımları için yeni kullanımlar sürekli araştırılmakta ve keşfedilmektedir.

Tüm olumlu özelliklerine karşın titanyum, sürtünme ve aşınma özellikleri nedeniyle hareketli temasın gerçekleştiği mühendislik uygulamalarında yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle titanyum ve alaşımları genellikle aşınmanın kritik olmadığı uygulamalarda tercih edilmektedir. Sürtünme ve şiddetli aşınma sonucu titanyum kullanılan uygulamalarda enerji ve malzeme kaybı olmaktadır. Aşınma sonucunda korozyon direncini sağlayan oksit yapısı bozulmakta ve aşınmanın yanı sıra şiddetli korozyon da meydana gelmektedir. Titanyumun sürtünme ve aşınma özeliklerini geliştirmek için yüzey modifikasyon tekniklerinin uygulanması gerekliliği açıkça ortaya konmuştur. Zayıf olan bu özelliklerin geliştirilebilmesi için günümüzde çok çeşitli yüzey işlemleri uygulanmakta ve başarılı sonuçlar alınabilmektedir. Yapılan bu çalışmada, havacılık sanayiinden biyomedikal uygulamalara kadar birçok alanda kullanılan Ti6Al4V alaşımının kullanımını sınırlayan zayıf tribolojik özelliklerini incelemek amacı ile basınçlı kumlama işlemi, hem ısıl işlem yapılmış hem de ısıl işlem yapılmamış numunelerine uygulanmıştır. Ayrıca atımlı lazer sistemi kullanarak yüzeyde çok sert bir tabaka oluşturulmaya çalışılmış ve Ti6Al4V alaşımının kötü olan tribolojik özelliklerine katkısı incelenmiştir.

Titanyum ve alaşımlarının özellikleri ve diğer metaller ile aralarındaki üstünlükler hakkındaki bilgiye Bölüm 2' de yer verilmiştir. Ayrıca titanyumun üretim yöntemleri ve teknolojisi ile titanyum alaşımlarının çeşitlerine değinilmiş, ısıl işlem özelliklerinin yanı sıra titanyum ve alaşımlarının kullanım alanları geniş bir şekilde anlatılmıştır.

Bölüm 3' de deneysel çalışmada kullanılan kumlama, ısıl işlem ve Nd:YAG lazer

sistemi ayrıntılı olarak incelenerek kumlama sonrası yüzeyden alınan pürüzlülük ölçümünün tekniği ve kullanılan cihaz anlatılmıştır.

Deneysel çalışmaların irdelendiği Bölüm 4 üç kısımdan oluşmaktadır. Birinci kısımda numune üzerine çeşitli parametrelerde kumlama yapılarak yüzeyde oluşan topoğrafyalar incelenmiş, ağırlık kayıpları ve pürüzlülük değerleri ölçülmüştür. İkinci kısımda Ti6Al4V alaşımına çeşitli ısıl işlemler uygulayarak yapısal değişimler incelenmiştir. Ayrıca ısıl işlem uygulanan numuneler farklı parametreler ile kumlanmış ve birinci kısımda olduğu gibi ağırlık kayıpları ve pürüzlülük değerleri ölçülmüş, yüzeyde oluşan izler incelenmiştir. Üçüncü kısımda ise Nd:YAG lazer kullanılarak numuneler üzerinde ergimiş bölgeler oluşturulup yapısal değişimin yanı sıra sertlik değişimleri geniş bir şekilde incelenmiştir.

Bölüm 5' de; yapılan deneylerin sonuçları ve bulgular ayrıntılı bir şekilde yorumlanmıştır.

Bölüm 6' da ise tezde yapılan çalışmaların sonuçlarına yer verilmiştir.

BÖLÜM 2. TİTANYUM VE ALAŞIMLARI

2.1. Titanyum Malzeme Ve Özellikleri

Mühendislikte kullanılan metaller arasında doğadaki yaygınlığı bakımından alüminyum, demir ve magnezyumdan sonra dördüncü sırada yer alan Titanyum metali ilk olarak 1791 yılında William Gregor tarafından bulunmuştur. Kömür küllerinde ve volkanik kayalarda yoğun olarak bulunan, yoğunluğu az (hafif) bir metaldir [1].

Titanyum, periyodik cetvelin 4. grubunda yer alan, çok sert, gümüşi beyaz, parlak bir elementtir. Ergime noktası 1660^{o}C, kaynama noktası 3287^{o}C, özgül ağırlığı 4.5 gr/cm^{3}'tür. Metalik halde kuvarsı çizecek kadar serttir [2].

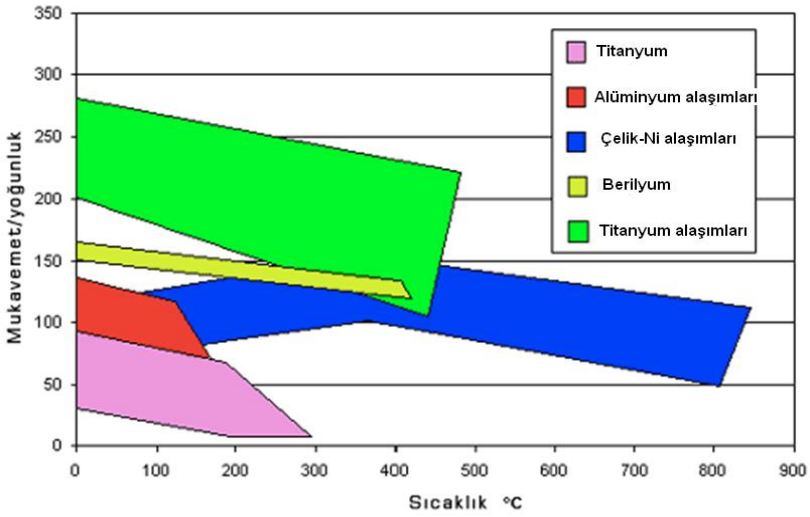
Tablo 2.1.Titanyum, Alüminyum ve Demir 'in bazı fiziksel özellikleri.

	Titanyum	Alüminyum	Demir
Yoğunluk (gr/cm^{3})	4.54	2.7	7.87
Elastiklik Modülü (GPa)	115	62	194
Ergime Noktası(^{o}C)	1668	660	1536
Oda sıcaklığındaki kristal yapısı	HSP	YMK	HMK

Titanyum; çelik kadar dayanıklı ancak ondan % 45 daha hafiftir. Alüminyumdan ise % 60 daha ağır olmasına karşın dayanımı 2 kat daha fazladır (Tablo 2.1). Dayanımı ve asitlere karşı direnci nedeniyle, çeşitli alaşımların yapısına katılır. Deniz suyuna karşı üstün bir dayanıklılığı sahip olması nedeni ile deniz suyundan tatlı su elde edilen tesislerde ve tuzlu suya temas eden gemi donanım parçalarının yapımında kullanılır [4,6,7].

- Oksitlenmeye, ter asidine, korozyona, kimyasal maddelere karşı diğer alaşımlara göre 20 kat daha dayanıklıdır.
- Her biçimde mevcuttur. (Kütük, Yuvarlak, Altıgen, Lama, Çubuk, Plaka, Sac, Tel istenen her çeşit).
- Kolaylıkla kaynak edilir.

- Yangına ve darbelere dayanıklıdır.
- Biyolojik uyumluluğa sahiptir ve toksit değildir.
- Fiyatı diğer yüksek performans malzemelerine yakındır.
- Uygun kriyojenik özellikleri vardır. (-150 °C'nin altındaki ortamlardaki davranışları) [3].



Şekil 2.1. Mukavemet / Yoğunluk oranının Sıcaklıkla değişimi.

Titanyum ve titanyum alaşımları yüksek mukavemet, korozyon direnci ve düşük ağırlık gibi özellikleri bünyesinde bir arada barındıran önemli mühendislik malzemeleridir. Titanyum ve alaşımlarının bazı alaşımlarla mukavemet/yoğunluk oranı – sıcaklık değişimi karşılaştırması Şekil 2.1 'de gösterilmiştir.

Titanyum ve alaşımları henüz 1952 yılından beri kullanımda olduğu için nispeten yeni mühendislik malzemeleridir. Bu malzemeler, yüksek bir dayanım/yoğunluk oranına, yaklaşık 550^{o}C 'ye kadar yüksek sıcaklık özelliklerine, oksitleyici asitlere ve klotritli (ClO_2) ortamlara karşı yüksek korozyon direncine sahiptirler [4].

Bu üstün metalik özelliklerine karşın cevher üretiminin çoğu metale indirgenmeden TiO_2 (titanyum oksit) biçiminde kullanılır. Titanyum nadir bir element olarak bilinirse de yer kabuğunda en çok bulunan altıncı elementtir. Cevher yoğunlaşmasının seyrek olması ve cevherden titanyum eldesinin çok zor olması onu değerli bir metal yapar.

En önemli titanyum mineralleri; rutil, ilmenit ve anatastır.

Rutil: Tetragonal sistemde kristallenir. Sertlik derecesi 6-6.5; özgül ağırlığı 4.2-4.4 gr/cm^3'dür; rengi sarımsı kırmızı, siyah ve kızıl kahvedir. Elmas cilalıdır. Kimyasal bileşimi TiO_2'dir.

İlmenit: Trigonal sistemde kristallenir. Sertlik derecesi 5-6, özgül ağırlığı 4-4.5 gr/cm^3'dür. Rengi siyahtır. Metalik ve yarı metalik cilalıdır. Kimyasal bileşimi $FeTiO_3$'dir [2].

Titanyum ve titanyum alaşımlarının günden güne üretimi artmaktadır [5].

Metalik titanyumu Rusya % 36, Japonya % 36, Kazakistan % 25 ve diğer devletler % 3 oranında dünya piyasalarına arz etmektedirler [3].

Titanyum kimyasal yönden kuvvetli bir indirgeyicidir. Bu özelliği bazen olumlu bazen de olumsuz sonuçlar vermektedir. Özellikle düşük sıcaklıklarda kimyasal ortamlara direnci oldukça yüksektir. Oksitleyici asitlere ve deniz suyuna karşı çok dayanıklı iken, göreceli olarak asitlere karşı direnci biraz daha düşüktür. Uygulamada asetik asit, sülfürik asit ve tartarın asit ortamlarında kullanılabilmektedir. Diğer yandan klor gazı, hidroflorik asit, trikorasetik asit ve fosforik asit içeren ortamlarda kullanılmamalıdır. Yükselen sıcaklıkla birlikte titanyumun yüzeyindeki koruyucu asit tabakası parçalanmaya başlar ve kullanılabilirliliğini düşürecek derecede oksijen, azot ve hidrojen malzeme içerisine nüfuz eder. Genel olarak yüzeydeki oksit tabakası 600 ºC'ye kadar tekniği yönünden önemli problemler doğurur. Zira metale nüfuz eden yabancı maddeler gevrekleşmeye ve çatlak oluşumuna sebebiyet verir [2].

Titanyum alaşımları iki belirgin özellikleriyle ön plana çıkmaktadırlar. Yüksek mukavemet ve üstün korozyon dayanımları bu metal ve alaşımlarının havacılık sektörünün, kimya endüstrisinin ve medikal mühendisliğin vazgeçilmezi haline getirmiştir. Bu olumlu özelliklerine karşın titanyum sürtünme ve aşınma özellikleri nedeniyle hareketli temasın gerçekleştiği mühendislik uygulamalarında yetersiz kalmaktadır. Titanyumun zayıf tribolojik özellikleri, yüksek ve değişken sürtünme katsayısı titanyum ve alaşımlarının kullanımını sınırlamaktadır. Bu nedenle titanyum ve alaşımları genellikle aşınmanın kritik olmadığı uygulamalarda tercih edilmektedir. Yapışmaya varan sürtünme ve şiddetli aşınma sonucu titanyum kullanılan

uygulamalarda enerji ve malzeme kaybı olmaktadır. Aşınma sonucunda korozyon direncini sağlayan oksit yapısı bozulmakta ve aşınmanın yanı sıra şiddetli korozyon da meydana gelmektedir. Titanyumun sürtünme ve aşınma özeliklerini geliştirmek için yüzey modifikasyon tekniklerinin uygulanması gerekliliği açıkça ortaya konmuştur. Zayıf olan bu özelliklerin geliştirilebilmesi için günümüzde, çok çeşitli yüzey işlemleri uygulanmakta ve başarılı sonuçlar alınabilmektedir [8-10].

2.2. Üretim Yöntemi ve Teknoloji

Titanyum cevheri rutil (TiO_2) ve ilmenit ($FeTiO_3$) 'dir. Bunların ısıl işlemlerden geçirilerek saf titanyum elde edilmesi oldukça masraflıdır. Titanyum cevheri öğütülüp magnetik alandan geçirilerek içerisindeki demiroksitten arındırılır ve ardından uygulanan çökeltme teknikleri ile diğer yabancı maddeler uzaklaştırılır. Geriye kalan TiO_2 sülfürik asitle reaksiyona sokularak titanil-sülfirik asit elde edilir. Daha sonra bu asidin sıcak su ile karıştırılması sonucu TiO_2 çöker ve filitre ile süzülerek alınır. Sonuçta TiO_2 saf olarak elde edilmiş olur. Bu bileşiği indirgemek için Kroll tarafından 1939 yılında geliştirilmiş "Kroll Yöntemi" kullanılır.

Bu yöntemle ancak 1947 yılında teknik üretime geçirilebilmiştir. Kroll usulüne göre TiO_2, C ve Cl ile karıştırılıp 800 ºC'e kadar ısıtılır ve $TiCl_4$ elde edilir. Oluşan titanyum klorür 135 ºC'de yoğunlaştırılıp kısmi destilasyon ile saflaştırılır. Ardından 800 ºC civarında erimiş magnezyum üzerinden geçirilir. Sonuçta titanyum süngeri denilen iri parçalı poröz bir metal meydana gelir. Bu malzemede ark fırınında ve vakum altında ısıtılarak son kalan magnezyum parçaları buharlaştırılır ve yaklaşık % 99 saflıkta titanyum elde edilir [11].

2.3. Kullanım Alanları

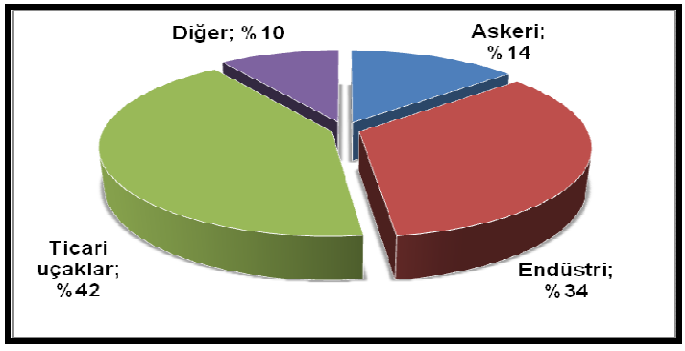
Titanyum kullanımını iki ayrı bölümde değerlendirmek gerekir:

A- Metal ve alaşımları
B- Oksit ve diğer bileşikleri

Metalik titanyum üstün fiziksel ve kimyasal özellikler gösterir. Bu nedenle; uzay aracı, uçak ve füze yapımında yeri doldurulamaz bir metaldir. Yüksek hız, titreşim ve yüksek ısının söz konusu olduğu araç kısımlarında, motor türbin kanatlarında ve benzeri aşırı yüklenen diğer araç bölümlerinde çok kullanılır. Kimyasal dayanıklılığı nedeniyle korozif kimyasal madde üreten fabrikalarda sıkça kullanılır.

Titanyum oksit şu anda bilinen en beyaz boya maddesidir. Titanyum beyazı adı altında boya endüstrisinde geniş çapta kullanılır. Bunun dışında; kozmetik endüstrisi, linolyum (muşamba), yapay ipek, beyaz mürekkep, renkli cam, seramik sırı, deri ve kumaş boyanması, kaynak elektrotları yapımı ve kâğıt endüstrisi gibi pek çok alanda da kullanılmaktadır. Bu kadar çok kullanım alanı olmasına karşın; üretilen tüm titanoksidin % 60'ı boya endüstrisi tarafından tüketilir. Diğer bileşiklerinden titanklorit, kumaşların rengini ağartmada; tetraklorit yapay sis eldesinde; titanyum karpit aşındırıcı olarak kullanılır [2].

Titanyum kullanımı ilk olarak havacılık ve uzay endüstrisiyle başlarken zamanla söz konusu üstün özellikleri nedeniyle birçok alana yayılmaya başlamıştır. Hafifliği ve yüksek mukavemeti nedeniyle havacılık uygulamalarında kullanılırken, iyi korozyon direnci göstermesi ile kimya endüstrisinde ve denizcilik uygulamalarında vazgeçilmez bir malzeme olmuştur. Diğer yandan biyomedikal uygulamalarda (ortopedi ve dişçilik) her üç özelliği nedeniyle kabul görmüştür [12]. Şekil 2.2'de dünyadaki titanyum tüketiminin oranları görülmektedir.



Şekil 2.2. Dünyadaki titanyum tüketimi oranları.

Uzay roketlerinin en önemli parçalarını titanyum alaşımlar oluşturmaktadır. Sürtünme yüzünden yüksek sıcaklıklara ulaşan roket uçlarında, yakıtın yandığı motor bölümünde ve gazların egzoz çıkışlarında aşırı ısınma sorunu titanyum alaşımların

yüksek erime sıcaklıkları (1677°C) sayesinde ortadan kaldırılmıştır. Titanyum alaşımların kullanımı geçmiş yıllarda yüksek maliyetleri açısından sadece yarış otomobillerinde ve özel üretim otomobillerde sınırlı kalırken, günümüzde üretim tekniklerindeki gelişmeler sayesinde otomotiv endüstrisinde kullanımı giderek artmıştır. Titanyum alaşımların otomotiv endüstrisinde kullanım amaçlarından en önemlisi; otomobil ağırlığını minimuma indirerek, CO_2 yayılımı ile ortaya çıkan küresel ısınma sorununu olabildiğince azaltmaktır [1].

Titanyum ve alaşımlarının; kimyasal, endüstriyel, denizcilik ve uzay ile ilgili uygulamaların geniş bir yelpazesinde üstün, oldukça güvenilir ve ekonomik olduğu teknik açıdan kanıtlanmıştır. Geleneksel olarak titanyumun kullanımı uzay, havacılık ve deniz sanayi alanlarında yoğunlaşmıştır. Metalin kuvvetli ve rijit yapısı, düşük özgül ağırlığı ve görece hafif oluşu, yüksek sıcaklıklara dayanıklılığı ve korozyona karşı direnci kullanımın bu özel alanlarda yaygınlaşmasına neden olmuştur. Son otuz yılda metalin yeni işleme yöntemlerinin gelişimine paralel olarak biyomedikal aparatlardaki ve dental implantlardaki kullanımı artmaktadır [13].

Titanyumun genel kullanım alanları Türkiye için de geçerlidir. Ülkemizde; kaynak elektrotları endüstrisi, boya endüstrisi, tekstil endüstrisi başlıca kullanım alanlarıdır. Bunların yanı sıra deri, yapay elyaf, matbaa mürekkebi, lastik, likit gaz, çelik ve seramik endüstrilerinde de kullanılır [2].

Titanyum halen diğer yaygın kullanıma sahip metaller gibi kesintisiz üretim yöntemine sahip olmayışı ve cevherlerinin düşük zenginlikte oluşu nedeniyle pahalı bir malzemedir. Yine de diğer metallerin bir arada sunamadığı özelliklere sahip oluşu sayesinde çok çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır [13].

2.3.1. Biyomedikal uygulamalarda

Biyomalzemeler, insan vücudundaki organ ya da dokuların işlevlerini yerine getirmek veya desteklemek amacıyla kullanılan malzemeler olup, metaller, seramikler, polimerler ve kompozitler olmak üzere 4 gruba ayrılırlar. Biyomalzemelerde en önemli özellik biyouyumluluk olup, kendisini çevreleyen

dokuların normal değişimlerine engel olmayan ve dokuda istenmeyen tepkiler (iltihaplanma, pıhtı vb.) oluşturmayan malzemelerdir. Metalik biyomalzemelerden olan titanyum ve titanyum alaşımları, kemikle bağlanması iyi olan ve doku tarafından kabul edilirliği yüksek olan biyomalzemelerdir [2]. Şekil 2.3'de dokuların titanyum alaşımı üzerinde gelişimi görülmektedir.



Şekil 2.3. Dokuların titanyum alaşımı ile uyumu.

Titanyum alaşımlar yüksek korozyon dayanımı özellikleri nedeniyle insan vücudunda implant olarak kullanılan en önemli metallerdir. İnsan vücudunda bulunan asidik sıvının Ph değeri 7.4'tür. Titanyum alaşımlar bu asit değerinden etkilenmedikleri için insan vücuduna adaptasyon bakımından en uygun metallerdir [1].

Nikel-titanyum alaşımları, deforme edildikten sonra, ısıtıldıkları zaman ilk şekillerine dönebilme özelliğine sahiptirler. Bu özellik, (Shape Memory Effect-SME) "şekil hafıza etkisi" olarak adlandırılır. Bu alaşımın SME etkisi, ilk olarak Buehler ve arkadaşları tarafından gözlemlenmiştir. Şekil hafıza etkisinin gerekli olduğu bazı biyomalzeme uygulamaları, diş köprüleri, kafatası içerisindeki damar bağlantıları, yapay kalp için kaslar ve ortopedik protezlerin üretiminde kullanılırlar [2].

Titanyumun, biyomalzeme üretiminde kullanımı 1930'lu yılların sonlarıdır. Titanyum implant yüzeyinde oluşan oksit tabakasının, titanyumoksit (TiO_2)'e benzediği ve metal-oksit ara yüzeyindeki oksitlerin karışımını değiştirdiği rapor edilmiştir.

Titanyumun avantajları:

- Uzun süreli implantasyonda (deri içine yerleştirme) iyi biyouyumluluk.
- Enjekte edilen maddelerle birlikte, kimyasal reaksiyona girme olasılığı azdır.
- Manyetik olmadığından, MR (Manyetik Rezonans) için uyumludur.
- Yoğunluğu düşük olduğundan dolayı, hafiftir.
- Hipoalerjiktir (alerjik özelliği az) [2].

Son yıllarda titanyum ve titanyum alaşımlarının, medikal ve dental uygulamasında ciddi bir artış görülmektedir. Son otuz yılda metalin yeni işleme yöntemlerinin gelişimine paralel olarak biyomedikal ürünlerdeki kullanımı artmaktadır. Bugün titanyum ve alaşımları protez eklem, cerrahi splint, damar stentler ve bağlayıcıları, dental implant, kuron köprü ve parsiyel protez yapımında kullanılmaktadır [14].

Reaksiyona yüksek meyili aynı zamanda titanyumun arzu edilen birçok özelliğinin oluşumuna neden olmaktadır. Neredeyse anında oksit olarak, metal yüzeyinde yaklaşık 10 nanometre kalınlığında dirençli ve stabil bir oksit katmanı oluşur. Bu oksit katmanı kıymetli metallerde olduğu gibi yüksek bio-uyumlu bir yüzey ve korozyona karşı direnç özelliği sağlar. Ayrıca bu oksit katmanı porselene kaynaşma, polimere yapışma ve implantlarda plazma püskürtme veya çekirdek apatit ile kaplama yöntemlerine katkıda bulunmaktadır [2].

Titanyum 25 yıldan daha çok süreden beri kemik içi ve suberiostal implant olarak kullanılmaktadır. Kemik içi implantlar çubuk, post ve blade şeklinde saf veya alaşımlı titanyumdan yapılır. İmplant yüzeyindeki oksit tabakasının inert etkisi, fizyolojik sıvı, protein, sert ve yumuşak dokunun metal yüzeyini kavramasını sağlar. Canlı doku ve implantın statik ve fonksiyonel olarak bu birleşme işlemine, osseointegrasyon denilmektedir. Titanyum ayrıca bio-uyumlu implant malzemesi olarak da başarıyla kullanılmıştır [14].

“Bio-integration”, biyoaktif bir yüzeyde kemik gelişimini tetikler ve kemik ile implant arasındaki bağı direk etkiler. Biyoaktivite lifli doku arasına girmeksizin bir malzemenin canlı dokuya bağlanma özelliğidir. Kemikle bağlanması iyi olan ve doku

tarafından kabul edilirliği yüksek olan titanyum, yerleştirildikten sonra vücudun bir parçası haline gelir. Bu da implanta maksimum dayanım sağlamaktadır [2].

Bazı araştırıcılar, implant yüzeyindeki 1 mm'den daha ufak çukurlukların yabancı proteinleri tutmasına, ama savunma hücrelerinin geçişine izin vermeyeceği (locus minoris resistance) için uzun dönemde osseointegrasyonun kaybına sebep olacağını düşünmektedirler. Bu sava dayanarak, cilalı yüzey saf titanyum implantların kullanımını önermektedirler. Ancak, günümüzde yüzey pürüzlülüğü olan veya farklı kaplama tiplerine sahip saf titanyum veya alaşımlarından mamül implantların da başarılı oldukları bilinmektedir [15].

2.3.2. Havacılık uygulamalarında

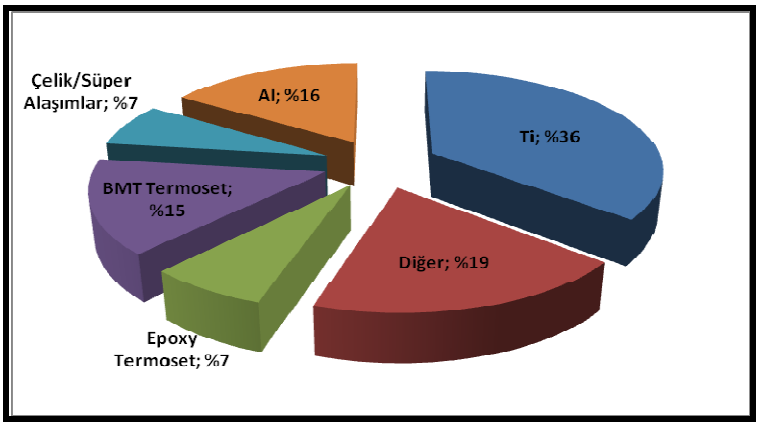
Titanyumun havacılık sanayinde yaygın kullanımının önemli sebepleri;

- Hafiflik
- Çalışma sıcaklığı
- Korozyon direnci
- Polimer matrisli kompozitlerle galvanik uyumluluk
- Hacim kısıtlamasıdır.

Günümüzde otomobil sanayi ürettiği bir aracın ağırlığındaki bir kilogramlık hafifletme için 15$ maliyeti tolere edebilirken, havacılıkta bu rakam atılan her bir kilogram fazladan ağırlık için 1500$'a çıkmaktadır. Eğer üretim çok daha ileri teknoloji gerektiren uzay faaliyetleri ile ilgili ise bu rakam 15000$ civarına yükselmektedir. Bu durum titanyumun diğer üstün özellikleri dışında sadece düşük yoğunluğu sayesinde kendisine havacılık sanayinde neden önemli bir pazar yakaladığını açıklayan güzel bir örnektir.

1940'ların sonunda geliştirilen Ti6Al4V alaşımı halen havacılık uygulamalarında önemli bir yere sahiptir. Alüminyum alaşımlarının, yüksek mukavemet çeliklerinin veya nikel esaslı süper alaşımların yüksek sıcaklıktaki kararlılıklarının yetersiz

kaldığı durumlarda titanyum alaşımlan ön plana çıkmaktadırlar. Şekil 2.4'de F22 savaş uçağında kullanılan malzemelerin oranları görülmektedir.



Şekil 2.4. F22 savaş uçağında kullanılan malzemelerin oranları.

Büyük ticari uçaklara bakıldığında, gövde yapısında ortalama % 5-9 arasında titanyum kullanılmaktadır. Ancak çalışma sıcaklığının, çok dikkate alındığı motorlarda ise titanyum kullanımı ağırlıkça % 33-38 civarındadır. Uçak motorlarında hacimsel oranlara bakıldığında titanyum alaşımları en çok kullanılan malzemedir. Havacılık sanayinde, mekanik özellikler kadar üretilen parçaların kullanım ömürleri de önemlidir. Titanyum alaşımlarının kullanıldığı parçaların uzun kullanım ömürleri, o parçaların fiyat-kullanım ömrü kıyaslamasında öne geçirmektedir. Uçak gövdelerinde yapısal eleman olarak titanyum kullanılmasındaki maksat, yorulma çatlağı ilerleyişini durdurmaktır.

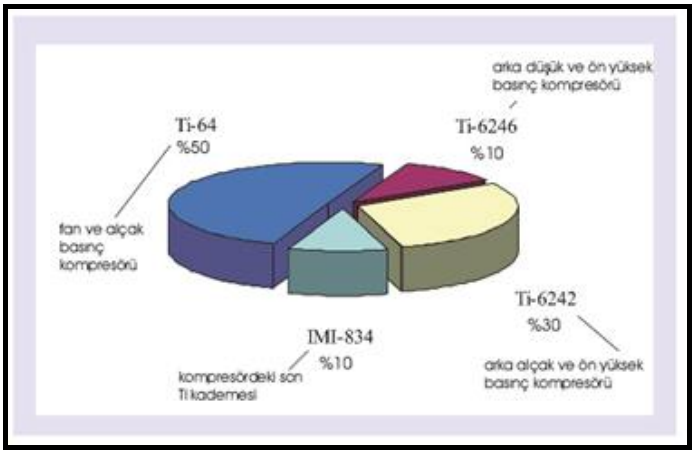
Uçakların yüksek korozyon direnci ve kısmi mukavemet gerektiren içindeki yaşam alanlarında sıkça ticari saflıkta titanyum kullanılır. Yüksek üretim maliyetlerine rağmen uçakların ana iniş takımları için dövme titanyum alaşımlarının kullanımı gittikçe yaygınlaşmaktadır. Yüksek mukavemet çeliklerinden imal edilen ana iniş takımlarının kullanım ömürleri dolmadan sıkça gerilmeli korozyon şüphesi ile değiştirilmeleri bu malzeme yerine, yeterli mukavemete sahip dövme titanyum alaşımları tercih edilmektedir. Bu tercih aynı zamanda büyük bir ticari yolcu uçağında 270-300 kg civarında bir ağırlık azalımını da sağlamaktadır. Ticari uçaklarda kullanımı ile kıyaslandığında askeri uçaklardaki titanyum kullanımının daha fazla olduğu görülmektedir. Askeri uçaklardaki yapısal parçaların maruz kaldığı termal ve mekanik yükler daha yüksek sürat ve zorlayıcı manevralar nedeniyle

artmaktadır. Askeri uçaklarda gövde imalatında kullanılan titanyum oranı % 50'lere varmaktadır. Askeri uçaklarda kullanılan titanyum parçalar arasında en büyük olan kritik parça, maruz kaldığı tekrarlı ve yüksek yükleri taşıma görevindeki kanat kutusudur.

Titanyumun havacılıkta ana kullanım alanlarından biri de gaz türbin motorlarıdır. Modern gaz türbin motorlarının ağırlıkça % 33'ü titanyum alaşımlardan oluşmaktadır. Titanyum alaşımların uçak motorlarında kullanımı 1950'li yıllarda başlamıştır. İlk olarak kompresör kanatçıkları titanyumdan imal edilmeye başlanmış, daha sonra kompresör disklerinin de titanyumdan üretimine geçilmiştir [7].

Titanyum, 593 °C (1100 °F)'ye kadarki operasyon sıcaklıklarında en yaygın kullanılan malzemedir.

Şekil 2.5'de motordan beklentilere bağlı olarak Ti-alaşımı cinslerinin kullanım oranları gösterilmiştir. Bu alaşımların motorda kullanıldıkları bölgeler ve gelecekteki ihtiyaçlar ile birlikte verilmiştir [17].



Şekil 2.5. Motordan beklenenlere bağlı olarak Ti alaşımı cinslerinin kullanım oranı.

Uçak sanayisinde en yaygın olarak kullanılan titanyum alaşımları ve bunların özellikleri şöyledir;

* % 99.0 Ti: İyi işlenebilirlik ve orta düzeyde mukavemet özelliklerine sahiptir. Uçaklarda yanma duvarları, kompresör kaplamaları, egzoz çıkış kaplamaları, gövde bölme duvarlarında geniş çapta kullanılır. 20 ºC'deki yoğunluğu 4.54 gr/cm³ 'tür.

Tavlama sıcaklığı 590-732 ºC'dir, gerektiğinde gerilme giderme tavlaması yapılır. Bu işlem 537 ºC'de 15-20 dakikadır. Bundan sonra havada soğutma uygulanır. Gazaltı koruyuculu ark kaynağı, direnç kaynağı ve nokta kaynağı uygulanır.

* Ti - 6Al - 4V Alfa-Beta Tipi Alaşım: 315 ºC sıcaklıklara kadar yüksek mukavemete sahiptir. Uçakların gaz türbin kompresör kapakçıklarında ve disklerinde, dövme uçak bağlantılarında, preslenmiş uçak gövde yüzeylerinde, metal levha halindeki gövde parçalarında kullanılır.

* Ti - 5Al - 2.5Sn Alfa Tipi Alaşımı: Uçak egzoz bağlantılarında ve diğer dövme levha komponentlerinde 480ºC 'ye kadar çalışır. Roket yakıt tanklarında, uçak gaz türbini kompresörlerinin yataklarında, kaynaklı statör bağlantılarında, içi boş kompresör kanatçıklarında ve kaynaklı borularda geniş çapta kullanılır. 20 ºC'deki yoğunluğu 4.46 gr/cm³ 'tür. Tavlama, 830 ºC'de 30 dakika yada 880 ºC'de 10 dakikadır. 537 yada 560 ºC'de 1-2 saat tavlamadan sonra gerilme giderme işlemi yapılmalıdır. Ticari saf titanyuma uygulanan kaynak işlemleri bu alaşıma da yapılabilir.

* Ti - 8Mn Alaşımı: 93-315 ºC arasında çalışan uçak kaplama ve birincil yapı elemanlarında kullanılır. Tam tavlama, 680-700 ºC 'de 1 saattir. Sonra havada soğutulur. Ergitme kaynağı uygulanamaz. Ancak nokta kaynağı dikkatice yapılmış konstrüsiyonlarda kullanılabilir.

* Ti - 7Al - 4Mo Alaşımı: Uçak gaz türbin kompresör kanatçıklarında, disklerinde kullanılır. 20 ºC'deki yoğunluğu 4.48 gr/cm³'tür.

* Ti - 4Al - 4Mn Alaşımı: Uçak gövde elemanlarında kullanılır. 20 ºC 'deki yoğunluğu 4.52 gr/cm³'tür. Tavlamasında, 720 ºC'de 2 saat ısıtılır ve dakikada 2 ºC düşecek biçimde fırında soğutulur [2].

2.3.3. Titanyum ve alaşımlarının otomotiv uygulamaları

Titanyum otomotiv endüstrisinde ilk kez 1950'lerin ortalarında kullanılmaya başlanmıştır. General Motor firmasının "Titanium Firebird II" adlı deneysel aracın

tüm dış yüzeyi titanyum kullanılarak tasarlanmıştır. Hiç üretilmeyen bu araç, hava sürtünmesi kaynaklı ısınmadan korunmaya ihtiyaç duyan hızlı yarış arabaları hariç titanyum dış yüzeyli tek araçtır.

Yakıt tasarrufu sağlayan ve çevreye daha az zarar veren araçlara olan talebin artması araçların ağırlığının hafiflemesi ve performansın arttırılmasını gerektirmiştir. Bu noktada yüksek korozyon direnci ve güce sahip titanyum alaşımları başlıca tercih maddesi olmuştur. Ancak titanyumun maliyeti arttırması otomotiv endüstrisinde daha yaygın olarak kullanılmasının önündeki en büyük engeldir ve kullanımını yarış otomobilleri, motorları ve Formula 1 araçları gibi yüksek performans ve dayanıklılık gerektiren araçlarla sınırlamıştır.

1990'ların sonunda "Altezza" modellerinde motor sübapında titanyum kullanan Toyota seri ve toplu üretimde ilk kez titanyum kullanan otomotiv firması olmuştur. Titanyum sübapların üretiminde toz metalürjisi yöntemi kullanılmıştır. Giriş sübaplarının üretiminde Ti6Al4V/TİB tozu, yüksek ısılı çıkış sübaplarında ise Ti-Al-Zr-Sn-Nb-Mo-Si/TiB tozu kullanılmıştır. Altezza'nın motorunda 16 sübap bulunmaktadır ve bunların ağırlığı çelik sübaplarda yaklaşık 700 gram iken Altezza'da 400 gramdır.

Süspansiyon yayları çelik yerine titanyumun kullanımının oldukça ekonomik olduğu bir otomotiv elemanıdır. Özellikle titanyumun çeliğe oranla çok daha düşük elastik modüle ve düşük kayma modüle sahip olması tercih sebebidir. Geleneksel süspansiyon yayı malzemesiyle karşılaştırıldığında, düşük modül, artan süspansiyon sapmasına ve bir sarmal hareketinde daha az süspansiyon hareketine yol açmaktadır. Böylelikle ağırlık sadece titanyumun düşük yoğunluğundan değil aynı zamanda süspansiyon sarmallarının daha kısa olmasından da kaynaklanmakta ve hem artan taşıma kapasitesine hem de motor ya da yolcu alanının daha geniş olmasına katkıda bulunmaktadır.

Formula 1 araçları uzun süre motosiklet yarışlarında da kullanılan titanyum yaylardan faydalanmıştır. Ancak dünyada ilk kez seri üretim araçta titanyum yay kullanan grup Volkswagen olmuştur. Lupo "FSI", 2000 yılından beri arka süspansiyonlarında titanyum kullanılan küçük bir otomobildir. Lupo'nun arka

süspansiyonları için geleneksel Ti6A14V alaşımı yerine TIMETAL LCB (Ti6.8Mo4.5Fe1.5Al) kullanılmıştır. Bu bir beta alaşım olduğundan dolayı daha düşük kayma modülüne sahiptir, standart α+β alaşımlardan da daha düşük ve fiziksel avantajı arttıran bir etkisi vardır. Buna ek olarak bu alaşım Ti6Al4V'dan çok daha ucuzdur.

Egzoz otomotiv endüstrisinde titanyumun kullanıldığı diğer bir elemandır. Avustralyalı motosiklet üreticisi KTM "LC8" motorlarının egzoz sisteminde titanyum kullanmaktadır. Ağırlık azaltmak için egzoz çıkışındaki et kalınlığı 0.3 mm'ye kadar düşürülebilmiştir. Dünyanın lider spor egzoz sistemleri üreticisi olan Remus motosikletler için sadece 2.5 kg olan titanyum kaplama egzoz sitemleri üretmektedir. Azalan ağırlık seri üretim otomotiv sektöründe titanyum kullanılarak üretilen egzoz sistemlerinin kullanılmasının en önemli sebebidir. 2001 yılından bu yana General Motors'un sahip olduğu spor araba Chevrolet Corvette Z06'nın egzoz sisteminin alt yapı elemanlarında titanyum kullanılmaktadır. 18,6 kg paslanmaz çelik ile karşılaştırıldığında titanyum egzoz çıkışı yalnızca 11 kg'dır.

Titanyumun pahalı bir malzeme olması kullanım yaygınlığının önündeki en önemli engeldir. Yakın gelecekte titanyum fiyatlarının çok fazla düşmesi beklenmemektedir. Umut edilen, yüksek hacimli otomotiv pazarında fiyatların havacılık alanındakinin yarısı ya da üçte biri oranında ucuzlayacağı ve böylece otomotiv endüstrisinde de titanyumun daha yaygın olarak kullanılmasıdır [7].

2.3.4. Titanyum ve alaşımlarının diğer bazı kullanım alanları

Mimari, titanyumun daha yakın zamanda kullanılmaya başlandığı bir alandır. Bunun öncülüğü Japonya'da yapılmıştır. Japonya'nın havacılık endüstrisi diğer ülkelerle karşılaştırıldığında çok küçüktür ve bunun sonucu olarak titanyum kullanımı havacılık dışı alanlara yaygınlaştırılabilmektedir. Titanyum çatılı ilk bina 1973 senesinde inşa edilmiştir. 1980'lerden bu yana iç ve dış kaplama malzemelerinde, perde duvarlarda, kolon örtülerinde, gölgeliklerde, koruyucu kaplamalarda, sanatsal çalışmalarda, heykel, plaka ve anıtlarda titanyum kullanılmaktadır. Mimari uygulamalarda titanyum kullanımının bir nedeni estetik bir diğeri de yüksek

dayanıklılıktır. Titanyum gerilim, oyuk ve aralık korozyonuna ve asit yağmurlan tarafından meydana gelebilecek diğer korozyonlara karşı neredeyse bağışıklıdır. Bu nedenle imalatçılar dış cephe ve çatıların dayanıklılığına dair 100 sene garanti verebilmektedirler [16].

Titanyum daha çok asit yağmuru, volkanik serpinti, kentsel kirlilik gibi şiddetli atmosfer koşullarına maruz kalan parçalarda da kullanılmaktadır. Burada titanyum binanın atmosfer koşullarından en az hasar almasını sağlamaktadır.

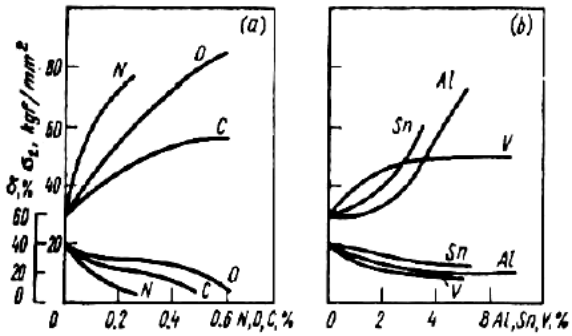
Titanyumun bir başka avantajı da paslanmaz çeliğin yarısı, alüminyum da üçte biri kadar bir ısıl genleşme katsayısına sahip olmasıdır. Bu durum inşasında fazla cam ya da beton kullanılan binalarda titanyum kullanımını ön plana çıkarmaktadır. Düşük ısıl genleşme katsayısının bir sonucu olarak hareketli çatılar gibi büyük titanyum yapılarda gece gündüz ısı farkının neden olduğu gerilim en aza indirilebilmektedir.

Titanyum alaşımları yüksek performanslı malzemeler olarak bilinmektedir. Yeni kullanım alanları araştırılırken yine yüksek performans gerektirecek alanların araştırılması gerekmektedir ve bu durum özellikle yüksek performans gerektiren spor dallarını öne çıkarmaktadır. Titanyum ve titanyum alaşımlarının kullanıldığı başlıca alanlar golf, tenis, bisiklet, su altı sporları, dağcılık, trekking ve kış sporlarıdır. Örneğin golf oynarken ana amaç topu mümkün olduğunca uzağa atabilmektir ve bunu sağlamak için golf sopasının ucu en önemli elemandır. Önceleri ağaç kullanılarak üretilen uçlar daha sonra çelik kullanılarak üretilemeye başlanmıştır. 1990'ların ortalarında ise ilk kez titanyum kullanılarak üretilen uçlar pazara sürülmüştür. Düşük ağırlıklı metaller kullanmak üreticilere daha büyük uçlar üretip ağırlığı hafif tutma şansını tanımaktadırlar. Üretimde genellikle Ti6A14V kullanılmakla birlikte Ti3A12.5V gibi diğer α+β alaşımlar da kullanılmaktadır [7].

2.4. Titanyum Alaşımlarının Özellikleri

Saf titanyum, büyük oranda kullanıldığı çevrelerin gözüyle bakılırsa, çok değerli bir malzeme değildir. Tercih edilmesini sağlayan asıl özelliklerini düşük oranlarda eklenen alaşım elemanları ile kazanır [18].

Ticari safiyette titanyum, içinde % 0,5-0,8 arasında yabancı madde bulunmaktadır. Titanyumu alaşımlandırmadaki esas amaç genellikle, korozyon mukavemetini artırmaktan çok mekanik nitelikleri yükseltmektir. Alaşımlandırmanın çekme mukavemeti ve kopma uzaması üzerindeki etkisi Şekil 2.6'da görülmektedir [19].



Şekil 2.6. Alaşım elementlerinin ve saflığı bozan maddelerin titanyumun mekanik nitelikleri üzerine etkisi. (a) Arayer katı eriyikleri oluşturan elementler; (b) Yeralan katı eriyikleri oluşturan elementler.

Alüminyum, oksijen, azot, karbon, kalay gibi elementler alfa stabilizatör, hidrojen, gümüş, altın, krom, demir, vanadyum, magnezyum, molibden gibi elementler ise beta-stabilizatör alaşım elementleri olarak adlandırılırlar. Katılan alaşım elementlerine bağlı olarak titanyumun mekanik, fiziksel ve kimyasal özellikleri de değişmektedir [2].

En çok kullanılan titanyum alaşım tipi genellikle Ti6Al4V sembolleri ile anılan % 6 alüminyum ve % 4 vanadyum içeren alfa-beta alaşımıdır. Bu alaşımın endüstriyel uygulamalardaki oranı % 45'tir. Ti6Al4V alaşımların en önemli özellikleri; korozyona karşı yüksek direnci, sertliği ve dayanıklılığıdır. Bunların yanı sıra bu alaşımlar işlenebilirlik, fabrikasyon, üretim deneyimi ve ticari olarak elde edilebilirlik gibi özelliklerinden dolayı ekonomik olarak kullanışlı bir hale gelmişlerdir. Bu özelliklerinden dolayı tıbbi uygulamalar başta olmak üzere, hava araçlarında ve basınç tankları yapımında çok fazla tercih edilmektedir. Ti6Al4V alaşımlarının kimyasal içeriği ve fiziksel özellikleri Tablo 2.2'de verilmiştir [1].

Tablo 2.2. Ti6Al4V alaşımının fiziksel özellikleri ve kimyasal içeriği.

Fiziksel Özellik	Değer	Kimyasal İçerik	Ti6Al4V
Yoğunluk g/cm^3	4.42	Alüminyum, Al	6,00%
Erime Sıcaklığı °C ±15°C	1649	Vanadyum, V	4,00%
Özgül Isısı J/kg.°C	560	Demir, Fe	0,10%
Hacimsel Elektrik Direnci ohm.cm	170	Oksijen, O	0,15%
Isısal İletkenlik W/m.K	7.2	Nitrojen, N	0,01%
Isısal Yayılma Katsayısı 0-100°C/°C	8.6x10-5	Hidrojen,H	<0,003%
Isısal Yayılma Katsayısı 0-300°C/°C	9.2x10-5	Karbon,C	0,03%
Beta Transus °C±15°C (°F)	999	Titanyum, Ti	Denge Miktarı

Günümüzde 100'den fazla titanyum alaşımı bilinmektedir. Bunların ancak 20-30 tanesi ticari kullanım sahasına sahiptir. Klasikleşmiş alaşımlar arasında Ti6A14V tek başına, kullanılan toplam titanyum alaşımı miktarının yarısını oluşturmaktadır. Alaşımlandırılmamış titanyum ise kullanılan toplam miktarın % 20 ila % 30'unu teşkil eder [20].

2.5. Titanyum Alaşımlarının Sınıflandırılması

Titanyum alaşımları genelde α, α+β ve β alaşımlar olarak sınıflandırılırlar. Sınıflandırma derinleştirildiğinde ise α'ya yakın (near α) ve yarı kararlı β alaşımları karşımıza çıkmaktadır. Titanyum malzemeler;

- Alaşımlandırılmamış (Saf) Titanyum
- α-alaşımları
- α-yakın (near-α) alaşımları
- α+β alaşımlar
- β alaşımları olarak da gruplandırılırlar [21].

2.5.1. Saf titanyum

Ticari saflıktaki titanyum (CP Ti), % 98.635 - % 99.5 oranında titanyum içermektedir. CP Ti oda sıcaklığında sıkı paket hekzagonal yapıdaki α fazında bulunmakta olup 885 °C'de hacim merkezli kübik yapıdaki β fazına dönüşür. Ayrıca

bu dönüşüm sırasında her iki fazın da bir arada bulunduğu küçük bir sıcaklık aralığı da vardır.

CP Ti, genellikle yüksek mukavemet gerektirmeyen ancak korozyon direncinin ön planda olduğu uygulamalarda tercih edilir. Oda sıcaklığındaki alaşımsız titanyumun mikroyapısı % 100 oranında α fazındadır. Katkı elementlerinin, özellikle de demir miktarının artmasıyla, mikroyapıda tane sınırlarında küçük fakat artan oranlarda β fazına rastlanır [4,18].

2.5.2. α titanyum alaşımları

Alüminyum, kalay veya zirkonyum içeren α alaşımları daha çok yüksek sıcaklık ya da çok soğuk ortamlarda tercih edilmektedir, α fazı zengin olan alaşımlar, β alaşımlarına göre yüksek sıcaklıklarda sürünmeye karşı genellikle daha dayanıklıdır. Çok düşük miktarda arayer atomu içeren α alaşımları, sünekliğini ve tokluğunu çok düşük sıcaklıklarda dahi sürdürmektedir.

α alaşımları, α+β alaşımları ve β alaşımlarının aksine kararlı α fazına sahip olduklarından ısıl işlem ile sertleştirilememektedir. Fakat soğuk işlem sonrası oluşan kalıntı gerilmeleri yok etmek için yeniden kristalleşme tavlaması veya sadece tavlama işlemi yapılabilmektedir. Dövülebilme kabiliyeti çok düşüktür ve dövme sıcaklığı aralığı α+β alaşımları veya β alaşımlarından daha dardır. Dövme sırasında oluşan yüzey ve/veya göbek çatlakları bunu açıkça göstermektedir. Böyle bir oluşumu önlemek için de dövme işleminde deformasyon miktarının daha küçük seçilmesi ve malzemenin sık sık tavlanması gerekmektedir. Tek fazlı yapıya sahip α alaşımına Ti5A12.5Sn alaşımı örnek olarak gösterilebilir [4,18].

α alaşımları en çok kimya sanayi ve proses mühendisliğince kullanılır. Bu uygulamalarda gerekli olan çok yüksek korozyon dayanımı ve deformasyon kabiliyetine sahiptirler. CP-Titanyumun mukavemet gereksinimini karşılayamadığı yerlerde, en eski titanyum alaşımı olan ve uzun zaman önce kabul görmüş Ti-5A1-2.5Sn alaşımı tercih edilir. Düşük sıcaklıklı uygulamalar olan hidrojen depolama ve basınçlı araçlarda yaygın olarak kullanılmaktadır [4].

2.5.3. α yakın (near-α) titanyum alaşımları

α-fazı sabitleyicileri olarak bilinen Al, O gibi elementleri fazla miktarda, Mo, V gibi β-fazı sabitleyicilerini ise düşük miktarda içerirler. "Süper alfa" ya da α'ya yakın (near-alpha) alaşımlar olarak bilinen bu alaşımların mikroyapısındaki α fazı yüksek kararlılığa sahiptir ve sınırlı miktarda β fazını kararlı kılan elementler içermektedir [4,18].

Klasikleşmiş biçimde, α'ya yakın alaşımlar yüksek sıcaklık gerektirecek uygulamalarda kullanılırlar, α alaşımlarının üstün sürünme dayanımı ve α+β alaşımlarının yüksek mukavemeti α'ya yakın alaşımlarda bir arada bulunur. Günümüzde çalışma sıcaklıkları 500-550 °C'a kadar çıkmıştır. Ti-8Al-1Mo-1V, yüksek sıcaklık için geliştirilmiş ilk titanyum alaşımıdır. Ancak yüksek alüminyum içeriği zayıf gerilmeli korozyon dayanımına sebep olur. Bu sebeple sonradan geliştirilen bütün titanyum alaşımları en fazla % 6'ya kadar alüminyum içeriğine sahiptirler. 1970'lerde yapılan bir çalışma içerikte en fazla % 0.1'e kadar olan silisyumun, Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo'nin sürünme dayanımını çok arttırdığını ortaya koymuştur. Bugün en gelişmiş yüksek sıcaklık titanyum alaşımı Amerikan TIMETAL 834 olarak bilinir. Kullanım sıcaklığı üst limiti olan 600 °C'de uzun süre kararlı davranmakta ve oksidasyona karşı koruma sağlamaktadır [22].

2.5.4. α+β titanyum alaşımları

Bu alaşımlar, bileşimlerinde α ve β fazlarının kararlılığını artıran bir ya da daha fazla kararlaştırıcı alaşım elementleri içerirler; α ve β fazını kararlaştırıcı elementlerin uygun bir şekilde ayarlanmasıyla oda sıcaklığında α ve β fazlarının karışımı olan bir mikroyapı elde edilebilmektedir. Tavlama sonrasında da yüksek süneklik, homojenlik ve yüksek dayanım sağlanmaktadır [4]. Düşük yoğunluklu bu malzemeler, mukavemet ve korozyona dayanıklılık özelliklerini yüksek sıcaklıklara kadar korurlar [18].

En yaygın kullanılan α+β alaşımı Ti6A14V'dur [23]. 1950'lerde geliştirilmiştir ve bilinen ilk titanyum alaşımları arasında gösterilmektedir. Ti6A14V'un üstünlüğü sadece dengeli özellikleri değil, kullanılmış ve kullanılmakta olan titanyum

malzemeler arasında en yaygın olarak kullanılanı olmasıdır. Yaygın kullanımı özellikle havacılık sanayinde önemli bir kriter olan en çok test edilmiş, denenmiş ve geliştirilmiş titanyum alaşımı olmasını sağlamıştır. Diğer yaygın kullanıma sahip α+β alaşımları; yüksek mukavemet amaçlı geliştirilmiş Ti-6Al-6V-2Sn, yüksek mukavemet ve yüksek tokluğa sahip Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo, gaz türbin motorlarında 400 °C'a kadar olan sıcaklıklarda kullanılmak için geliştirilmiş Ti-6Al-2Sn-2Zr-2Mo-2Cr alaşımlarıdır [4].

Ti6A14V alaşımı toplam titanyum üretiminin % 50'inden fazlasını oluşturmaktadır [23]. Bu alaşımlardan yüksek mukavemet değerleri elde etmek için ısıl işlem uygulanabilmektedir. Bu yüzden α+β alaşımları 350-400 °C arasındaki sıcaklıklarda ve özellikle yüksek mukavemet gerektiren uygulamalarda kullanılabilmektedir.

Mukavemet artışı için, alaşım ilk olarak yarı kararlı doymuş hale getirilmek üzere çözeltiye alma sıcaklığından hızla soğutulmakta ve daha sonra yaklaşık 500 °C'de yaşlandırılmaktadır. Bu sırada mikroyapıdaki aşırı doymuş α ve β fazları çözünerek yapıya homojen bir şekilde dağılmakta ve sertlik artmaktadır [24].

2.5.5. β titanyum alaşımları

Bu alaşımlar bileşimlerinde önemli miktarda β fazını kararlaştırıcı alaşım elementleri içermektedir. Sertleştirilebilme, dövülebilirlik, soğuk şekillendirilebilme ve de yüksek yoğunluk gibi özellikleriyle diğer titanyum alaşımlarından farklılık arz etmektedir. Bu alaşımlar oda sıcaklığında α+β alaşımları ile aynı mukavemet değerlerine sahip olmasına rağmen yüksek sıcaklıklarda bu değerler α+β alaşımlarından sonra gelmektedir.

β alaşımları kararsız alaşımlardır ve α fazının β matrisi içinde çökeltilmesi ile sertleştirilirler. Yüksek kırılma tokluğuna sahip olup molibden içermeleri bu alaşımların korozyona karşı direncini artırır, α+β alaşımlarına göre daha iyi işlenebilirlikle beraber ısıl işleme daha yatkın olduğu bilinmektedir [22].

2.6. Titanyum ve Alaşımlarının Isıl İşlemleri

Titanyum ve alaşımlarına uygulanan ısıl işlemler, amaçlarına göre şöyle sıralanabilmektedir:

- Üretim esnasında oluşan artık iç gerilmeleri önlemek (gerilme giderme),
- Süneklik, boyutsal ve yapısal kararlılık ve talaş kaldırmaya uygunluk gibi önemli parametrelerin optimizasyonu (tavlama)
- Mukavemeti artırmak (çözeltiye alma ve yaşlandırma).

Bunlardan tavlama, çözeltiye alma ve yaşlandırma işlemleri malzemenin mekanik özelliklerini değiştirmeye yönelik işlemlerdir. Ayrıca tavlama ve gerilme giderme işlemleri; malzemenin içinde bulunacağı korozif ortamlara karşı direncini artırmak, çarpılmaları önlemek ve şekil verme öncesi malzemeyi hazırlamak amacı ile de uygulanabilmektedir [25].

Ancak yukarıda belirtilen işlemler bütün titanyum alaşımlarına uygulanamamaktadır. α ve süper-α alaşımlarına gerilme giderme ve tavlama işlemleri uygulanabilirken mukavemet artırıcı işlemlerin hiçbiri bu tür alaşımlarda etkili olmamaktadır.

α+β alaşımları, isminden de anlaşılacağı gibi, α ve β fazlarının dağılım yoğunluğuna göre farklı ısıl işlem karakteristikleri gösterirler, α+β alaşımları, kararsız β fazının parçalanması nedeniyle yaşlandırma esnasında sertleşme gösterseler de; β alaşımlarında olduğu kadar kararsız β içermediklerinden dolayı β alaşımları kadar sertleşememektedirler. Bununla beraber α ve β fazlarına yönelik ısıl işlemler ile mikroyapı ve mekanik özellikleri iyileştirilebilmektedir [26].

α+β alaşımlarına uygulanan son ısıl işlem sonrası yapı içerisinde süper-α alaşımlarına göre daha fazla β fazı kaldığı görülmüştür ve bu fazın belli bir değerde olması; ısıl işlemin türüne ve alaşım içerisindeki β fazını kararlaştırıcı elementlerin miktarına bağlı bulunmaktadır, α+β alaşımları çözeltiye alma ve yaşlandırma işlemleri ile sertleştirilebilmektedir. Çözeltiye alma işleminde malzeme genellikle ikili faz bölgesi yani α+β fazı sıcaklıklarına çıkarıldıktan sonra su, yağ ya da diğer soğutucular içerisinde soğutulmaktadır. Bu soğutma sonucunda çözeltiye alma sıcaklığında bulunan β fazı ya aynen kalmakta ya da soğuma sırasında dönüşüme

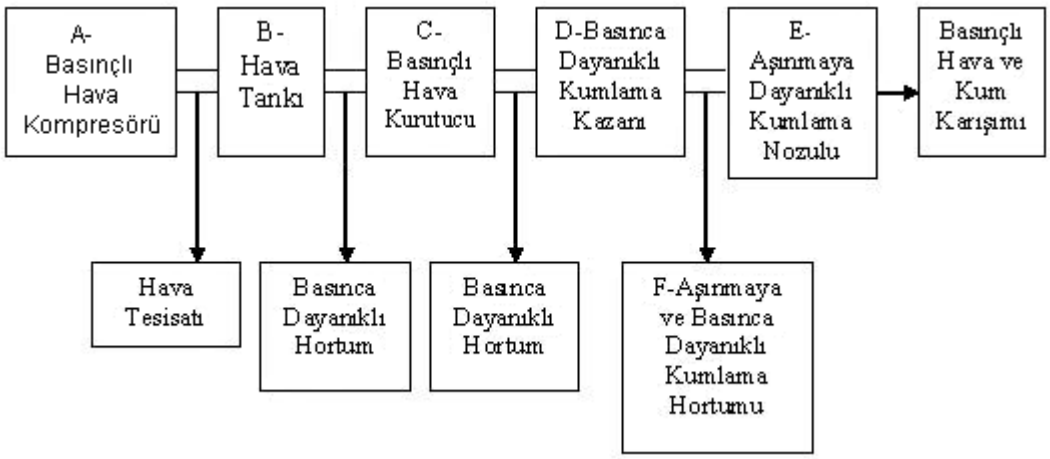
uğramaktadır. Bu işlem sonucundaki yapının içeriği kompozisyonuna, çözeltiye alma sıcaklığına, soğutma hızına malzemenin kesit boyutlarına bağlı olmaktadır. Çözeltiye alma işlemini normalde 480-650 °C'de yapılan yaşlandırma işlemi takip etmektedir ki bu işlem α ve β fazlarının çok iyi bir karışımı amaçlanmaktadır. Bilindiği gibi titanyum alaşımlarından en çok kullanılanı yine bir α+β alaşımı olan Ti6Al4V'dır [26].

BÖLÜM 3. TEKNİK BİLGİLER

3.1. Kumlama

Basınçlı kumlama işleminin ülkemizdeki geçmişi çok kısadır. Önceleri sadece deniz kumunun paslı yüzeye püskürtülmesi olarak bilinen kumlama işlemi, sanayimizin gelişmesiyle daha hassas malzemelere daha özel yöntemlerle uygulanmaya başlanmıştır.

Günümüzde kaplama öncesi pürüzlendirme veya yüzey sonlandırma amacıyla yoğun şekilde uygulanan kumlama işlemi, basınçlı hava ile yüzeye, kum olarak tabir edilen ve mikron boyutlarında olan malzemelerin püskürtülmesi olarak tanımlanabilir. Hava sayesinde yüksek bir hıza ve dolayısıyla momentuma sahip olan bu kumlar yüzeye çarptıklarında mikron mertebesinde izler bırakırlar. Oluşan bu izlerin derinliği ve şekilleri yüzeyin parlaklığına birebir etki ederler. Şekil 3.1'de basınçlı kumlama düzeneği şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 3.1. Basınçlı Kumlama Düzeneği.

Yüzeyin kumlanarak işlenmesinde rol oynayan başlıca elemanlar basınçlı hava, çeşitli özellikteki kumlar, hava ve kum tankları, kum püskürtme memeleridir. Ancak yüzey morfolojisini en çok etkileyen elemanlar, havanın basıncı ve kullanılan sarf malzemesinin cinsidir. Basınçlı hava bu işlemde itici güç olarak kullanılmakta ve yüzeye gönderilen sarf malzemelerinin etkisini belirlemektedir. Yüzeyin şeklini

belirleyen eleman ise kullanılan sarf malzemesidir. Sarf malzemelerini şekil itibariyle küresel ve köşeli olarak ikiye ayırmak mümkündür.

Köşeli taneciklerin oluşturduğu sarf malzemelerine grit adı verilmektedir. (Örneğin çelik grit, cam griti, dere kumu, alüminyum oksitler vb.) Bu malzemeler daha çok kaplama işlemleri öncesinde yüzeyin pürüzlendirilmesi amacıyla püskürtülürler. Köşeli malzemelerin çarpması ile pürüzlenen yüzey sonradan uygulanacak kaplayıcı elemanın yüzeye daha iyi tutunmasına olanak sağlar. Köşeli malzemeler kullanılırken dikkat edilmesi gereken birkaç önemli nokta çok iyi bilinmelidir. Öncelikle bu tip yıpratıcı malzemeler aynı bölgeye uzun süre uygulandıkları taktirde malzemenin toleranslarında değişikliğe neden olurlar. Bunun nedeni, yüzeye çarpan taneciklerin köşeli yapısından dolayı kesme etkisi yapmalarıdır. Yüzeyden çok küçük parçalar koparark pürüzlendirme yaptığından dolayı bu işlem sırasında aynı bölge üzerinde gereğinden fazla uygulama yapılmasından kaçınılmalıdır. Diğer bir önemli konu ise seçilen sarf malzemesinin boyutlarıdır. Daha sonradan uygulanacak olan kaplayıcı elemanlar genelde çok pahalı kaplama elemanları olduğundan, yüzeyin gereğinden fazla derinlikte pürüzlendirilmesi kaplayıcı elemanın tüketimini arttırmaktadır. Bu da maliyetleri olumsuz yönde etkilemektedir.

Küresel malzemelerle kumlanan yüzey ise, köşeli malzemelerle kumlanan yüzeyden oldukça farklıdır. Küresel sarf malzemeleri daha çok sonlandırma amacıyla kullanılmaktadır ve kumlama işlemden sonra ürün başka bir işleme sokulmadan satışa sunulmaktadır. Küresel malzemelerle yapılan kumlamanın amacı ise, üretim sırasında ürün yüzeyinde olusan izleri ve lekeleri ortadan kaldırmak ve ürün yüzeyine homojen bir görünüm vermektir. Daha sonradan bir boyama veya kaplama işlemi uygulanmayacaksa, yüzeylerin parlak olabilmesi ve kir tutmaması için mutlaka kumlama işleminin küresel şekilli sarf malzemeleri ile yapılması gerekmektedir. Sarf malzemesinin taneciklerinin şekilleri eğer köşeli olursa yüzeye çarptıklarında derin yarıklar oluşturacaktır. Bu derin yarıklar ışığın yoğun miktarda kırılmasına ve doğal olarak yüzeyin mat görünmesine neden olacaktır. Ayrıca oluşan bu derin yarıklara çeşitli kirlilikler yerleşecek ve kimyasal malzeme kullanmaksızın temizlenmesi mümkün olmayacaktır.

Kumlama işleminde önemli rol oynayan diğer bir eleman ise kum püskürtme memesidir (Nozul). Kumun çıkış yerinde yani kumlama hortumunun en uç noktasında bulunan ve yoğun sürtünmeye maruz kalan bu ekipmanın mutlaka aşınmaya dayanıklı bir malzemeden üretilmiş olması gerekmektedir. Nozulların çaplarındaki değişim içerisinden geçen havanın debisini belirler [28].

3.1.1. Yüzey pürüzlülüğü

Yüzey dokusu, yüzeyin üç boyutlu topografyasının oluştuğu nominal yüzeyden rastgele veya tekrarlı olarak meydana gelen sapmalar şeklinde tanımlanabilir. Yüzey dokusu;

- pürüzlüğü (mikro pürüzlük),
- dalgalanmayı (makro pürüzlük),
- yüzey paternini,
- yüzey hatalarını içerir.

Mikro pürüzlülük, moleküler boyutlardaki girinti ve çıkıntıların malzeme yüzeyinde ufak dalga boylarında oluşturdukları dalgalanmalar şeklinde görülürken, makro pürüzlülük daha büyük boyutlardaki girinti ve çıkıntıların büyük dalga boylarında oluşturdukları dalgalanmalar şeklinde görülür. Yüzey paterni ise üretim sistemine bağlı olarak oluşan, yüzey yapısı şeklinde açıklanabilir. Yüzey hataları ise üretim sırasında oluşan ve yüzey topografyasında kesintilere sebebiyet veren hatalardır.

Pürüzlülük; üretimde uygulanan işlemler sonucu parça yüzeyinde oluşan şekil ve dalgalanma hataları dışında kalan, oldukça düşük ve periyodik olarak tekrarlanan düzensizliklere denilmektedir.

Yüzey pürüzlülüğünün ölçülmesinin nedenleri;

- Üretilen bir parçaya ait ömür aşamalarını tespit etmek,
- Ürün kalitesini belirlemek,
- Müşteri memnuniyetini artırmak,
- Çeşitli makina elemanlarının çalışma performansını artırmak,
- Sızdırmazlık problemlerini ortadan kaldırmak,
- Yüzeylerde yansıtmayı artırmak



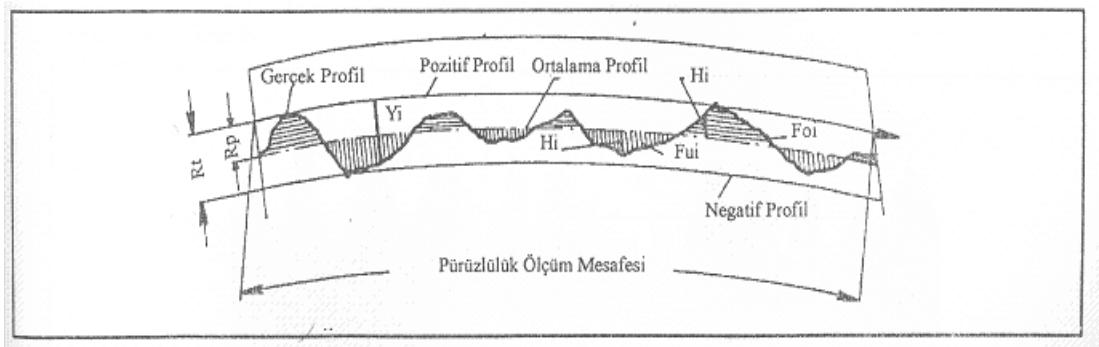
Şekil 3.2. Yüzey topoğrafyası.

Değişik üretim teknikleri sonucu nihai malzemede yüzey pürüzlülüğü (topografisi) görülür (Şekil 3.2). Mekanik, optik vb. özellikler açısından yüzey pürüzlülüğü uygulamada hayati önem taşır; örneğin makina elemanlarında mekanik yüklenme genelde yüzeyde maksimum seviyede etki eder. Her çeşit yüzey hatası, örneğin yüzey pürüzü çentik etkisinde bulunarak malzeme tokluğunu düşürür ve kırılmaya yol açar. Yüksek pürüzlü yüzeylerde tribolojik yüklenmeler aşınmanın hızlı gelişmesini sağlar.

Genelde makina sanayinde değişik çalışma koşullan için değişik yüzey profilleri öngörülür. Bu profiller değişik taşlama, zımparalama, parlatma vb. gibi işlemlerle sağlanır.

3.1.2. Pürüzlülük parametreleri

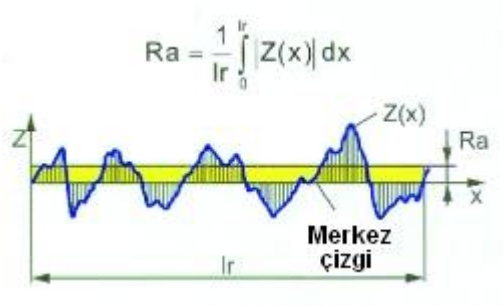
Yüzey pürüzlülüğü ölçümünde kullanılan temel kavramlar Şekil 3.3'de gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Yüzey ölçüm tekniklerinin temel kavramları.

Ra - Ortalama Pürüzlülük: Aritmetik ortalama, merkez çizgi ortalaması ve profilin aritmetik ortalama sapması olarak da bilinir. Ortalama pürüzlülük; pürüzlülük profili

ve onun ortalama çizgisi arasındaki alandır. Ortalama pürüzlülük yüzey bitirmede diğer parametrelere göre en genel olarak kullanılan parametredir (Şekil 3.4).



Şekil 3.4. Ra ortalama pürüzlülük parametresi.

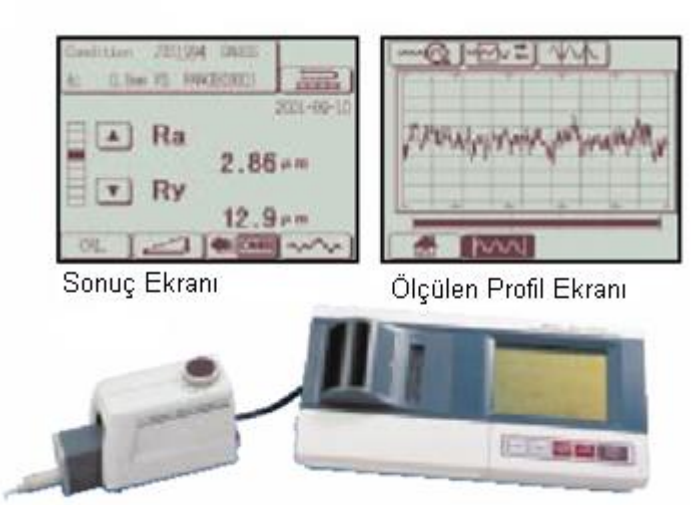
Ry (yada Rmax) - Tek kademe içerisindeki maksimum pürüzlülük yüksekliği: Standart bir -beş kademede alınan- iz için beş farklı R_y değeri vardır. R_y bu tek kademe içerisindeki maksimum pikten en derin vadiye dik mesafedir.

3.1.3. Pürüzlülük ölçüm cihazları

Malzemelerin içerdikleri yüzey pürüzlülüklerinin belirlenmesi amacıyla birtakım cihazlar geliştirilmiştir.

Mekanik profilometreler, elmas sivri bir ucun malzeme yüzeyinde gezdirilmesi sırasında sivri ucun, malzeme yüzeyindeki girinti ve çıkıntılardan geçerek malzemenin yüzey profilinin çıkarılması prensibine dayalı olarak çalışır.

Sivri elmas ucun malzeme yüzeyinde gezdirilmesi sırasında çıkıntı ve girintilerden geçerken dikey eksen boyunca hareket eder. Meydana gelen dikey yer değişimleri elektro-mekanik dönüştürücüler ile elektrik sinyallerine dönüştürülürler. Şekil 3.5'de deneyler sırasında kullanılan yüzey profilometresi cihazı şematik olarak görülmektedir [29].



Şekil 3.5. Mekanik pürüzlülük ölçme cihazı.

3.2. Isıl İşlem

Isıl işlem, metallerin mekanik özelliklerini (sertlik, mukavemet, aşınma dayanımını artırmak gibi) geliştirmek amaçlı uygulanan işlemlerin genel adıdır. Metalurjik bir işlem türüdür. Genel anlamda, metalleri belirli bir sıcaklıkta tavlayarak yapılarını istenilen faza getirmek suretiyle yapılır. Daha sonra metal ani olarak soğutulur ve bu sayede granüller (grain) oda sıcaklığında termodinamik açıdan denge fazı (phase) olmayan bir faza hapsolmuş olur. Bu faz genellikle malzemenin daha üstün mekanik özellikler gösterdiği bir fazdır.

Otomotivden, uçak, makine ve savunma sanayine kadar bir çok sektörde güvenlik, kalite ve ömür artışı için metallere uygulanan ısıl işlem hayati bir öneme sahip.

Zamanın gelişimi içinde ısıl işlemin ne zaman icat olduğu, kesin olarak bilinememektedir. Ancak eski çağlarda, demirin sertleştirilmesi için kızıl hale gelene kadar ısıtılıp su veya hayvansal yağa daldırılması sureti ile yapıldığı bilinmektedir. Günümüzde ise ısıl işlem, yüksek teknoloji ürünü ekipman ve kontrol teknikleri ile yapılmaktadır.

Malzemenin sertliğinin artması ile aşınma dayanımı da artar ama aynı zamanda malzeme daha kırılgan olur ve dayanıklılığı azalır. Yani ısıl işlem bazı mekanik özellikleri iyileştirirken bazılarını da kötüleştirir. Bu anlamda kullanım alanı için en uygun noktayı bulmak esastır. Isıl işlem sırasında; sıcaklık, zaman ve atmosferin eş

zamanlı kontrolü ile en uygun şartların oluşması sağlanarak istenilen nitelikteki malzeme üretilir.

Malzemenin sertliğini artırmak için veya aşındırıcı bir karakter kazandırmak için yapılan işlemler sertleştirme olarak adlandırılırlar. Normal sertleştirme de parçalar havada, yüzeyde karbon azalması veya karbon artması olmasından sakınmak için koruyucu gaz altında veya tuz banyosunda sertleştirme sıcaklığında yeterli homojenlikte ostenit oluşumu meydana gelene ve mevcut özel karbürlerin gereken kadarı çözülene kadar beklenmelidir. Bu işlemlerin ardından, martensit oluşumu için gerekli olan ani soğutma yapılar, soğutma ortamı olarak en çok su ve yağ, özel durumlarda ise hava kullanılır. Ayrıca başka değişik sertleştirme işlemleri de vardır bunlar; nitrürleme, yüzeye bor emdirme, indüksiyon akımıyla sertleştirmede ısıl işlemler içindedir.

Suda Sertleştirme: Isıtılmış çelik parçanın soğutulmasında en yüksek soğuma hızı parça ve su arasındaki sıcaklık farkının en yüksek olduğu durumda değil, bu farkın 350 ila 400°C olduğu görülür. Suda görülen bu durum yağ gibi diğer sıvılarda da geçerlidir. Su ile sertleştirme yağ ile sertleştirmeye göre üç kat daha fazla iyi sertleştirir. Suda sertleştirme endüstride kullanılan en etkili ve en yaygın sistemdir, çünkü ekonomik ve kolaydır.

Yağda Sertleştirme: Yağın soğutma gücü suyun 1/3'ü kadardır. Endüstride daha çok nebati ve mineral yağlar, nadirende hayvansal yağlar kullanılır. Fakat nebati yağlar sıklıkla değişmesi gerektiğinden pek ekonomik değildir. Genellikle mineral yağlar kullanılır. Kullanılan mineral yağlar; parlak soğutma yağları ve yüksek güçlü soğutma yağları olarak ikiye ayrılır.

Havada Sertleştirme: Ani soğutmalarda su ve yağ ortamlarının dışında nadirende hava kullanılır hava genelde çok ani soğuması istenmeyen mamüllerin fırın çıkışlarında kullanılır [30].

3.3. Lazerler

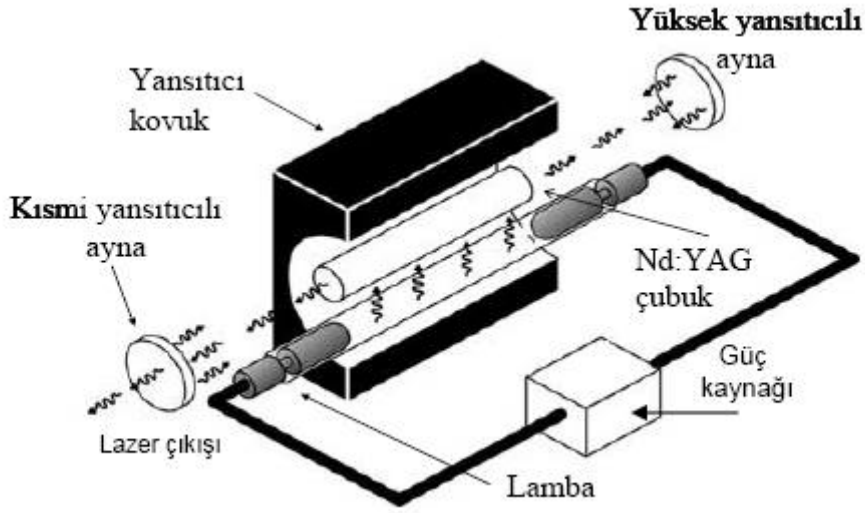
Uyarılmış yayılma ile ışığın güçlendirilmesi anlamına gelen "Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation" kelimelerinin baş harfleri ile simgelenen LASER, çeşitli yollarla elde edilen elektromanyetik ışımayı güçlendiren ve morötesi bölgesinden kızıl ötesi bölgeye kadar geniş bir spektrumda ışıma verebilen bir alettir.

Bir lazer ışını elde etmek için gerek ve yeter şartlar üç grupta ele alınır: Işığın kuvvetlendirilmesini sağlayan kazanç ortamı, ortamı uyaran güç kaynağı ve doyuma ulaşabilmek için geri besleme sistemleri. Lazerlerin, sağlık, endüstri, savunma sanayi, haberleşme gibi pek çok uygulama alanı vardır.

Yirminci yüzyılın en büyük buluşlarından biri olan lazerin temelini oluşturan uyarılmış ışıma kavramı 1917 yılında Einstein tarafından ortaya konmuştur. Mikrodalga güçlendirici sistemi ile uyarılmış yayılma sürecinin avantajının kullanıldığı MASER, mikrodalga bölgesinde ışıma yapan bir alet olarak Townes tarafından geliştirmiştir. İletişimde kullanılmak amacıyla geliştirilen, elektromanyetik spektrumun mikrodalga bölgesinde uyumlu (coherent) bir demet üreten bu ilk lazerde, amonyak buharı kullanılarak 1.25 cm dalga boyunda kazanç gözlenmiştir. Townes ve Schawlow; üretilen demetin kuvvetlenmesi için çevresi aynalar ile çevrili bir optik yükselteç sistemi tasarlamışlar ve bu çalışmaları ile Nobel ödülü almışlardır. Theodore Mainman 1960 yılında, kazanç ortamı olarak yakut kristali ve enerji kaynağı olarak flaş lambası kullanarak ilk mazeri üretmiştir. Takip eden yıllarda, yüksek şiddet gerektirmeyen ilk gaz lazeri olan helyum-neon lazeri; iletişim konusunda oldukça geniş bir kullanım alanı bulan ilk yarıiletken lazer; kesme, delme, kaynak gibi endüstriyel işlemlerde yaygın olarak kullanılan kızıl ötesi bölgesinde ısıma veren CO_2 lazeri ve yine kesme, delme, kaynak gibi endüstriyel işlemlerinin yanında cerrahi uygulamalar ve askeri alanlarda da kullanılan Nd:YAG lazeri üretilmiştir. Organik boya lazeri, soy gaz excimer lazeri, serbest elektron lazeri gibi çeşitli türde ve dalga boylarında lazerlerin üretilmesi, endüstri, sağlık ve savunma alanlarında teknolojik gelişmelere yol açmıştır. Lazerle üretilen plazma ortamının kazanç ortamı olarak kullanıldığı ve elektromanyetik spektrumun x-ışını bölgesinde demet üreten ilk x-ışını lazeri de 1985 yılında yapılmıştır. Lazer üretimi çalışmaları devam ederken, uygulamalarda en iyi verimin elde edilmesi amacıyla

değişik şekilerde lazer kovuk (kavite) sistemleri, geri besleme sistemleri tasarlanmıştır.

Tipik bir Nd:YAG lazerinin kazanç ortamı ve geri besleme sistemleri (kavite) Şekil 3.6'da görülmektedir. Flaş lambaları ile pompalanan kristal içinde demet oluşmaya başlar ve aynalar yardımı ile geri besleme sağlanır. Demet belli kazanç değerine ulaştığında kısmen geçirgen olan aynadan lazer çıkısı olmaya başlar.



Şekil 3.6. Tipik bir Nd-YAG lazerinin kazanç ortamı ve geri besleme (kavite) sistemleri.

3.3.1. Lazerlerin kullanım alanları

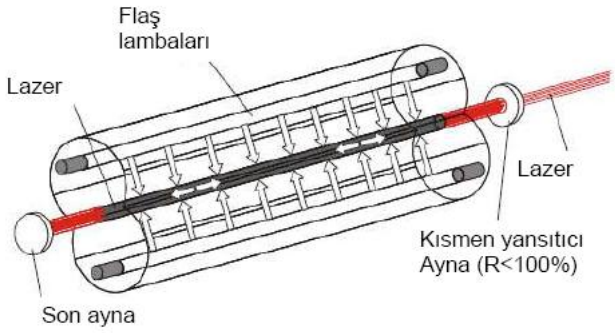
Günümüzde, normal ışık kaynaklarından farklı olmaları nedeniyle lazerler endüstri, sağlık, savunma gibi pek çok alanda oldukça sık olarak kullanılmaktadır. Lazer ışını uyumlu, spektral olarak saf ve yönlendirilebilir olmasından dolayı diğer ışık kaynaklarından çok farklıdırlar. Yakut lazerinden üretilen ilk atımlı lazer ile birlikte her geçen gün lazer çeşitleri ve kullanım alanları artmaktadır.

Nanosaniye atım uzunluğunda, Q anahtarlaması tekniği kullanılarak üretilen ilk lazerin bugün geldiği nokta attosaniye (10^{-18}) mertebeleridir. Savunma sanayinde kullanılan lazerler ülkelerin güvenliği için vazgeçilmez haline gelmiştir. Biyolojide hücrelerin canlı olarak incelenmesinde kullanılabildiği gibi medikal alanda ameliyatların gerçekleştirilmesinde de kullanılabilen lazerler insan ömrünün uzamasına da katkıda bulunmaktadır.

3.3.2. Nd: YAG lazer

Bu çeşit lazerler en popüler katı-hal lazerleridir. Kazanç ortamındaki ana kristal $Y^3Al_5O_{12}$ (YAG, Yttrium Aliminyum Garnet) ‘dır. Bu kristalde bazı Y^{+3} iyonları Nd^{+3} iyonları ile yer değiştirilir. Bunun yanı sıra kazanç ortamı fluoride ($YLIF_4$) veya vanadate (YVO_4) maddelerine ek olarak fosfat veya silikat camlar içerir. Tipik katkı oranı yaklaşık % 1‘dir. Yüksek dereceli katkı oranı, Nd^{+3} iyonlarının çaplarının Y^{+3} iyonlarından büyük olmasından dolayı, floresan zamanını kısaltmakta, çizgi genişliğini arttırmakta ve kristalde gerilmeye neden olmaktadır. Tüm bu etkilerde optik kaliteyi düşürmektedir. Nd:YAG lazeri dört enerji düzeyli bir sistemdir.

Nd:YAG lazerleri sürekli veya atımlı modda çalışabilirler ve hem lamba hem de AlGaAs yarı iletken lazerleri ile pompalanabilirler. Nd:YAG lazerine ait bir resonatör Şekil 3.7’deki gibidir [1].



Şekil 3.7. Nd:YAG lazer kovuğu.

BÖLÜM 4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

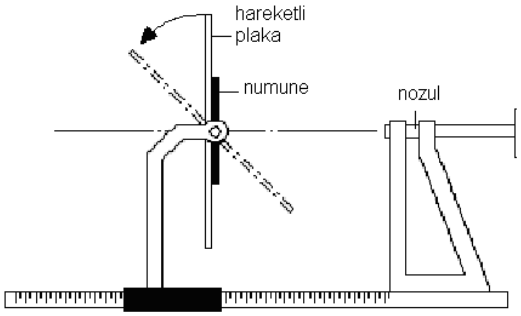
Tüm çalışmalarda kullanılan levha halindeki Ti6Al4V'un XRF (X-Işını Floresan Spektrometre) ile alınan elementsel analizi Tablo 4.1'de görülmektedir.

Tablo 4.1. Çalışmalarda kullanılan Titanyum alaşımının (Ti6Al4V) elementsel analizi.

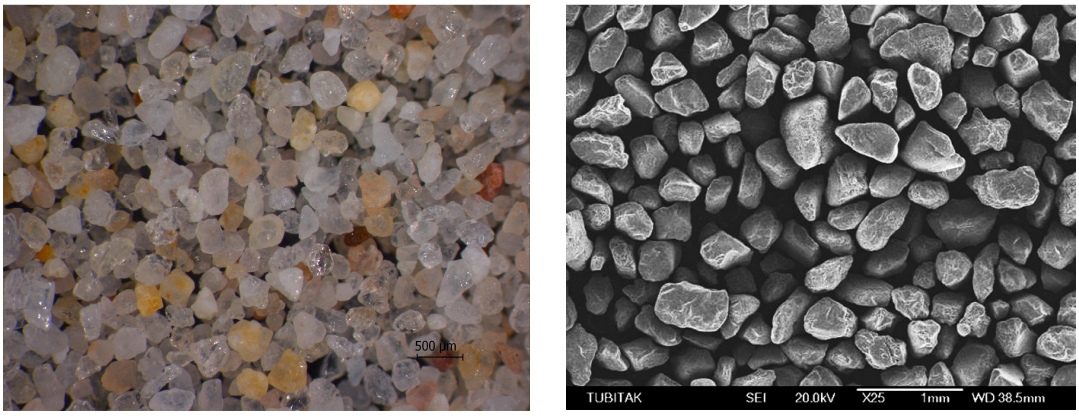
Element	% Ağırlık Oranı
Al	5.629
Fe	0.089
S	0.006
Si	0.052
Ti	91.455
V	2.769

4.1. Kumlama Çalışması

Bu çalışmada elmas testere ile kare plakalar halinde kesilmiş, 40x40x3 mm boyutlarında Ti6Al4V alaşımı numuneler kullanılmıştır. Kumlama çalışmaları, 5 bar'a kadar istenilen basınçta kum püskürtebilen bir kumlama makinası ile yapılmıştır. Kumlama kabini içine standart kabinlerde olmayan, numune üzerine kumlamayı açılı bir şekilde yapılmasını sağlayacak bir düzenek kurulmuştur (Şekil 4.1). Bu düzenek ile kabine sabitlenmiş kumlama tabancası, 15'er derece açı ile hareket edebilen plakanın üzerine sıkıştırılan numuneye, istenilen açılarda kum püskürtebilmektedir. Kumlama işleminde 200-300 μm'lik SiO_2 kumu (Şekil 4.2) çeşitli açı ve sürelerde numune üzerine 1.5, 3 ve 5 bar basınç ile uygulanmıştır (Tablo 4.1). Numune ile nozul arasındaki mesafe 40 cm olarak ayarlanmıştır. Kumlama öncesi ve sonrası numunelerin ağırlıkları hassas terazi ile ölçülmüştür. Kumlanan yüzeylerden, Mitutoyo pürüzlülük ölçme cihazı ile JIS B0601-1994/1982 (Japanese Industrial Standards) standardında, kumlama yönüne dik lineer pürüzlülük ölçümleri alınmıştır.



Şekil 4.1. Açılı kumlama yapılmasını sağlayan düzenek.



-a- -b-

Şekil 4.2. Kumlamada kullanılan SiO_2 kumunun ışık mikroskobu (a) ve SEM görüntüsü (b).

600.000 büyütmeye kadar çıkabilen Jeol JSM-6335F FEG (Field Emission Gun Electron Microscope) marka Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile numunelerde oluşan izlerin çeşitli büyütmelerde fotoğrafları çekilmiş ve yarı kantitatif elementel analiz yapan INCA EDS analiz ünitesi ile malzeme analizleri yapılmıştır.

4.2. Isıl İşlem Çalışması

Bu çalışmada elmas testere ile kesilmiş, 100x20x3 mm boyutlarında Ti6Al4V alaşımı numuneler kullanılmıştır. Numuneler 1200 °C sıcaklığa kadar çıkabilen HERAEUS marka fırında; oda sıcaklığından, Tablo 4.2'de belirtilen koşullarda çeşitli ısıl işlemlere ve soğutma koşullarına tabi tutulmuştur.

Tablo 4.2. Titanyum numunelere uygulanan ısıl işlem koşulları.

Isıl İşlem
Numune 0: Hiçbir ısıl işlem görmemiş orijinal numune
Numune 1: 1050 °C'ye kadar ısıtma+1 saat bekleme + Suda soğutma
Numune 2: 1050 °C'ye kadar ısıtma+1 saat bekleme + Havada soğutma
Numune 3: 1050 °C'ye kadar ısıtma+1 saat bekleme + Fırında soğutma
Numune 4: 1050 °C'ye kadar ısıtma+1 saat bekleme + Suda soğutma + 550 °C'ye kadar ısıtma+2 saat bekleme + havada soğutma
Numune 5: 1050 °C'ye kadar ısıtma+1 saat bekleme + Havada soğutma + 550 °C'ye kadar ısıtma+2 saat bekleme + havada soğutma
Numune 6: 1050 °C'ye kadar ısıtma+1 saat bekleme + Suda soğutma + 550 °C'ye kadar ısıtma+8 saat bekleme + fırında soğutma
Numune 7: 1050 °C'ye kadar ısıtma+1 saat bekleme + Havada soğutma + 550 °C'ye kadar ısıtma+8 saat bekleme + fırında soğutma
Numune 8: 950 °C'ye kadar ısıtma+1 saat bekleme+Su soğutma
Numune 9: 950 °C'ye kadar ısıtma+1 saat bekleme+Hava soğutma

Isıl işlemler sonrası numuneler metalografik inceleme için yüzey parlatma cihazı ile 120 ila 4000'lik zımpara kâğıtları kullanılarak parlatılmış, ardından 1 μm elmas pasta ve en son 0,5 μm collodial silika ile parlatılarak hazırlanmıştır. Mikro yapıların daha iyi görüntülenebilmesi için "85 ml H_2O+10 ml HF+5 ml HNO_3" 'dan [27] oluşan çözelti (kroll asid çözeltisi) ile dağlanıp "Nikon L 150 " model ışık mikroskobu ile yüzeylerin fotoğrafları çekilmiştir.

Numunelerin faz analizleri Shimadzu XRD 6000 model cihaz ile yapılmıştır. Bu cihaz, 20-60 kV voltaj aralığı, 2-50 mA akım aralığı ve 0-120 θ arasında çalışmaktadır. Elde edilen XRD patternleri titanyum kartlarındaki açı ve mesafelerle karşılaştırılarak faz analiz sonuçları tespit edilmiştir.

600.000 büyütmeye kadar çıkabilen Jeol JSM-6335F FEG marka Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile numunelerin çeşitli büyütmelerde fotoğrafları çekilmiş, yarı kantitatif elementel analiz yapan INCA EDS analiz ünitesi ile analizleri yapılmış ve yüzeyler 80 büyütmeye kadar çıkabilen Leica S6D Stereo Mikroskop ile makro olarak da incelenmiştir.

Numunelerin Vickers sertlik değerleri Zwick "ZHV 10" model cihazda 136°'lik elmas piramit uç ile 300 gr yük altında yapılmıştır (TS EN ISO 6507-1). Oluşan izler optik mikroskopta incelenmiştir.

Bu çalışmanın ikinci aşamasında ısıl işlem görmüş numuneler kumlamaya tabi tutulmuştur. Bölüm 4.1'de yapılan kumlama çalışmasında kullanılan cihaz ve düzenek bu çalışmada da kullanılmıştır (Şekil 4.1). Kumlama işleminde 200–300 µm'lik SiO_2 kumu (Şekil 4.2) 15, 45, 90 derecelik açılar ve 30 sn süre ile numuneler üzerine 2, 3 ve 4 bar basınç ile uygulanmıştır. Kumlama öncesi ve sonrası numunelerin ağırlıkları hassas terazi ile ölçülmüştür. Kumlanan yüzeylerden Mitutoyo pürüzlülük ölçme cihazı ile JIS B0601-1994/1982 (Japanese Industrial Standards) standardında, kumlama yönüne dik lineer pürüzlülük ölçümleri alınmıştır.

Yüzey çizilme dayanımı "CSM Mikro Scratch Tester" cihazı ile Rockwell S-218 uç kullanılarak; 20 N yük altında, 5 mm/dak hızla, 20 mm uzunlukta bir iz olacak şekilde yapılmıştır. Rockwell C standardında (TS ISO 3738-1) 200 µm radyüslü elmas piramit uç ile yüzeyi aşındırılmış ve oluşan çizilme izi ışık mikroskobu ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir.

4.3. Lazer-Gaz Nitrürasyon Çalışması

Bu çalışmada kullanılacak titanyum alaşımı numuneler (Ti6Al4V) 40X40X3 mm boyutlarında kare plakalar halinde elmas testere ile kesilmiştir. Numunelerin bir yüzleri yüzey parlatma cihazı ile 120 ila 4000'lik zımpara kâğıtları ile yüzey pürüzlülük değerleri yaklaşık Ra=0,75 µm ve Ry=4,51 µm olacak şekilde parlatılmıştır. Plakaların yüzeylerindeki organik ve inorganik artıkları gidermek amacıyla aseton ile temizlenmiştir.

Ti6Al4V alaşımının nitrürasyonunda Kocaeli Üniversitesi Lazer Teknolojileri Araştırma ve Uygulama Merkezinde (LATARUM) bulunan GSI Lumonics JK760TR atılımlı Nd:YAG lazeri kullanılmıştır (Şekil 4.3). Yüksek demet kapasitesine sahip bu lazer tüm metaller için kesme, delme, kaynak işlemlerini

yapabilecek kabiliyettedir. Nd:YAG lazerinin teknik özellikleri Tablo 4.3'de görülmektedir.

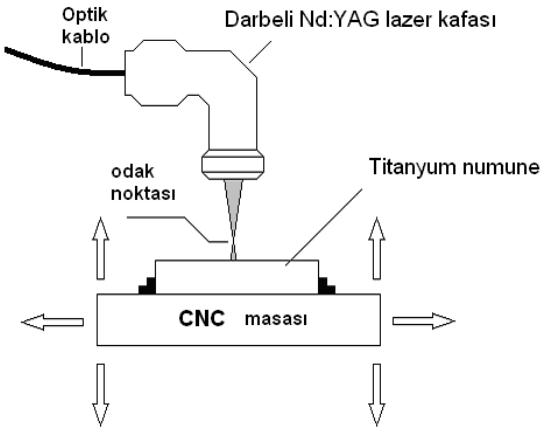
Tablo 4.3. Lazer Teknolojileri Araştırma ve Uygulama Merkezinde (LATARUM) var olan ve deneysel çalışmada kullanılan atımlı Nd:YAG lazerinin teknik özellikleri.

Maksimum ortalama güç	600 W
Maksimum tepe gücü	10 kW
Atım uzunluğu değişim aralığı	0.3 ms- 50 ms
Frekans değişim aralığı	5 Hz- 500 Hz
Demet kalitesi (mm.mrad)	28
Dalgaboyu	1064 nm



Şekil 4.3. Deneysel çalışmalarda kullanılan Nd:YAG lazer sistemi: güç ünitesi, lazer kovuğu ve odaklama ünitesi (LATARUM).

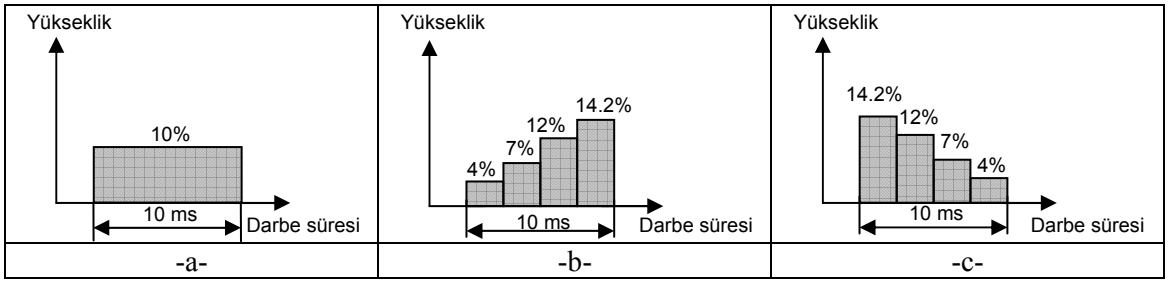
Lazer, odaklama ünitesinde bulunan (odak uzaklığı 160 mm) bir mercek ile lazer demeti üzerine odaklanmıştır. Odaklama ünitesinin hareketi, 3 eksende mikrometre hassaslıkta hareket sağlayabilen bilgisayar kontrollü bir CNC sistem sayesinde sağlanmıştır. Yüzey eritme işlemi sırasında lazer demeti titanyum levha yüzeyinin 3 mm üzerindeki bir noktaya odaklanmıştır. Yüzey ergitme işlemini görüntülemek için lazer kafasında bir kamera bulunmaktadır. Şekil 4.4'de lazer-gaz nitrürleme çalışmalarında kullanılan düzenek görülmektedir.



Şekil 4.4. Darbeli Nd:YAG lazer ile yapılan lazer-gaz nitrürleme çalışmasında kullanılan düzenek.

Yüzey eritme işlemi laboratuar atmosferi içersinde gerçekleştirilmiş, kullanılan koruyucu gazın lazerin ergittiği bölgede ergimiş malzemenin karışması, ısınması ve soğuması aşamalarına etki edeceği düşünülerek nitrojen gazı veya herhangi bir koruyucu gaz kullanılmamıştır.

Lazer ışınının enerji seviyesi, darbe frekansı ve darbe şekli gibi parametrelerinin etkisini incelemek amacı ile Şekil 4.5'de gösterilen üç değişik darbe tipi seçilmiştir.

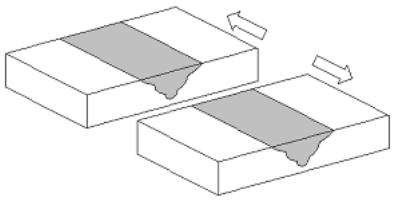


Şekil 4.5. Numunelere uygulanan lazer darbe şekilleri.
a. dikdörtgen tipi, b. artan-üçgen tipi, c. azalan-üçgen tipi.

Ti6Al4V kare plakaları üzerinde oluşturulan ergimiş bölgelerin makro fotoğrafları 80 büyütmeye kadar çıkabilen Leica S6D Stereo Mikroskop ile çeşitli büyütmelerde çekilmiştir.

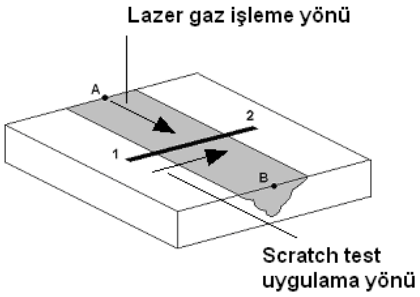
Daha sonra plakalar Şekil 4.6'de gösterildiği gibi ergime izine dik yönde soğutmalı olarak elmas testere ile kesilmiştir. Nüfuziyetin daha belirgin hale gelmesi için kesilen parçanın yan yüzeyi önce çeşitli zımparalar ile temizlenip, 6 mikron alümina ile pürüzsüzleştirdikten sonra Kroll (85 ml H_2O+10 ml HF+5 ml HNO_3) adı verilen

bir asit çözeltisi ile dağlanmıştır. Bu yüzeylerin makro fotoğrafları Leica S6D Stereo Mikroskop ile çekilmiş ve resim üzerinde ölçülendirmeler yapılmıştır.



Şekil 4.6. Numunenin ergime izine dik kesiminin şematik gösterimi.

Ergime bölgesinin üst yüzeyleri zımpara kullanılarak düzeltilmiş ve CSM Scratch Test cihazı ile ergime bölgesinin 60 mm/dk ve 20 N yük ile 10 mm çizilmesi sağlanmıştır. Scratch test uygulaması malzeme yüzeyine Şekil 4.7'de gösterilen 1 numaralı noktadan 2 numaralı noktaya doğru yapılmıştır. Ayrıca lazer işlemi ise Şekil 4.7'de gösterilen A noktasından B noktasına doğru yapılmıştır. CSM Scratch Test cihazı Rockwell-C standartlarında (TS EN ISO 3738-1) 200 μm elmas uç kullanarak numuneyi 0,03-30 N ve 300 mm/dk hız ile çizerek sürtünme kuvvet–normal yük ve nüfuziyet derinliği–derinlik grafikleri oluşturmaktadır. Scratch test malzemelerin tribolojik özelliklerini ve yüzey çizilme dayanımını incelemek için gerçekleştirilir. Yüzey çizilme dayanımı testini kullanarak numunenin aşınma direnci hakkında bazı bilgiler de elde etmek mümkündür. Bundan başka aşınma esnasındaki sürtünme katsayısı da ölçülebilmektedir.

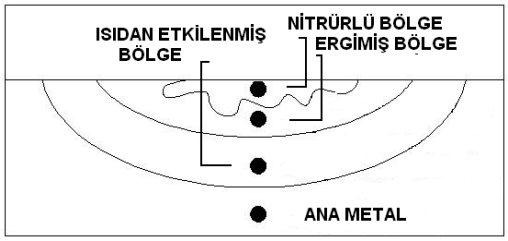


Şekil 4.7. Lazer ergitme ve yüzey çizilme dayanımı testinin (scratch test) şematik gösterimi.

Yüzey çizilme dayanımı testlerinin ardından 600.000 büyütmeye kadar çıkabilen Jeol JSM-6335F FEG marka Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile numunelerin çeşitli büyütmelerde fotoğrafları çekilmiştir.

Numunelerin faz analizleri Shimadzu XRD 6000 model cihaz ile yapılmıştır. Bu cihaz, 20-60 kV voltaj aralığı, 2-50 mA akım aralığı ve 0-120 θ arasında çalışmaktadır. Elde edilen XRD patternleri titanyum kartlarındaki açı ve mesafelerle karşılaştırılarak faz analiz sonuçları tespit edilmiştir.

Nüfuziyet bölgelerinde 136^{o}'lik elmas piramit uç ile 300 g yük altında Zwick "ZHV 10" model sertlik cihazı ile Vikers sertlik ölçümü yapılmıştır (TS EN İSO 6507-1). Ölçümler Şekil 4.8'de resmedildiği gibi ana metalden, ısıdan etkilenmiş bölgeden, erimiş bölgeden ve nitrürlü bölgeden alınmıştır.



Şekil 4.8. Sertlik ölçümlerinin alındığı bölgeler.

BÖLÜM 5. DENEYSEL ÇALIŞMALARIN BULGULARI

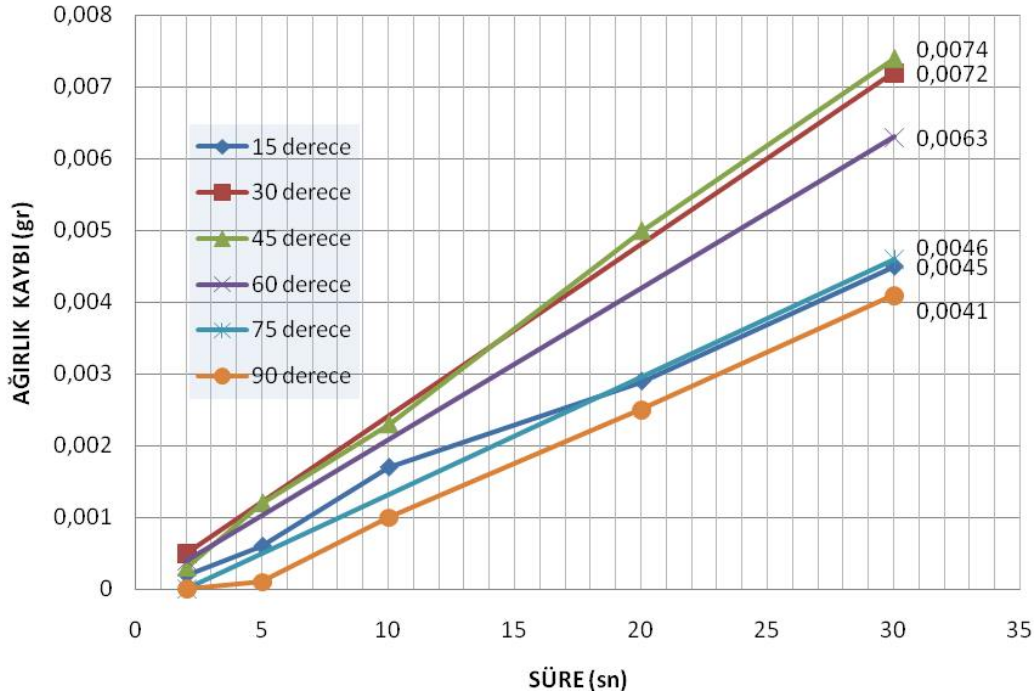
Bu bölümde, yapılan çalışmaların bulgularına ve yorumlarına yer verilmiştir.

5.1. Kumlama Çalışması Bulguları

İstenen pürüzlülük değerlerini elde etmek için kumlama ile ilgili deney parametrelerinin (basınç, çarpma açısı, süre v.b.) optimize edilmesi amacıyla kumlama çalışması yapılmıştır. Kumlama öncesi ve sonrası numunelerin ağırlık ölçümleri hassas terazi ile yapılıp, ağırlıklarındaki değişim incelenmiştir. Tablo 5.1'de 1,5 bar, Tablo 5.2'de 3bar ve Tablo 5.3'de 5 bar basınç ile yapılan kumlamaların tüm açı değerleri ve sürelerdeki ilk ağırlık, son ağırlık ve ağırlıklardaki değişimler gösterilmektedir. Ayrıca Şekil 5.1'de 1,5 bar, Şekil 5.2'de 3 bar ve Tablo 5.3'de 5 bar kumlama basınçlarında tüm açı değerleri için ağırlık kayıplarının kumlama süresi ile değişimi gösterilmektedir. Erozyon süresinin artması ile ağırlık kaybı arasındaki lineer ilişki hem tablolarda hem de şekillerde çok net görülmektedir.

Tablo 5.1. 1,5 bar basınç altında yapılan kumlama sonuçları.

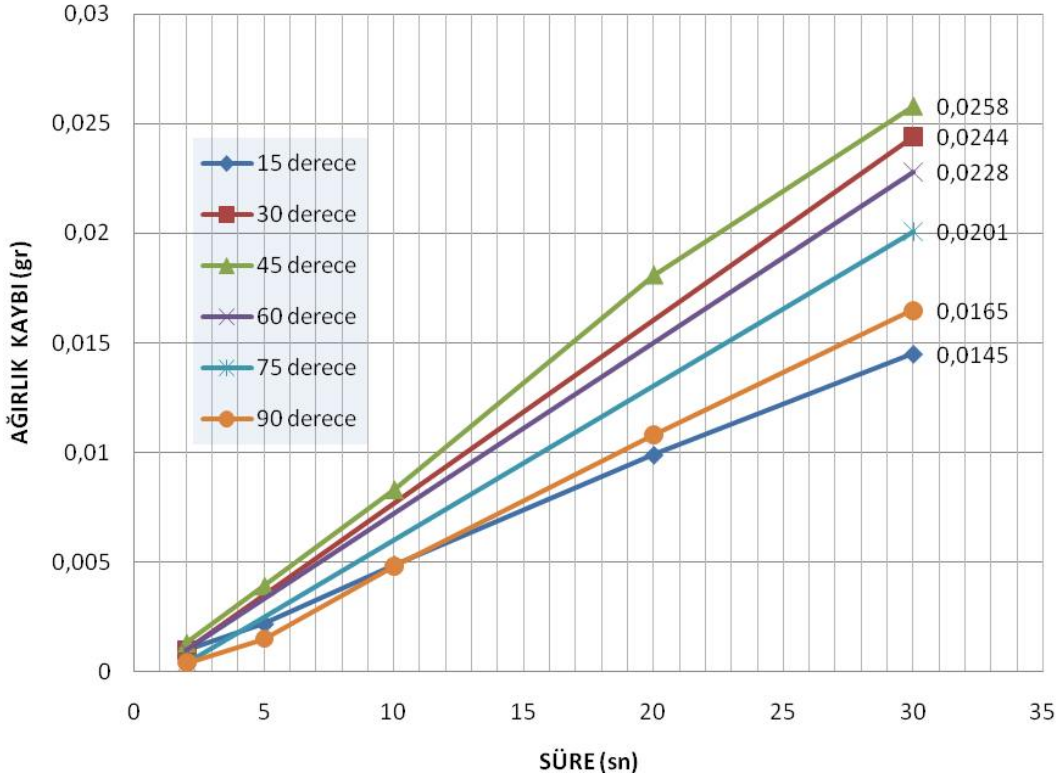
NUMUNE NO	BASINÇ (bar)	AÇI (°)	SÜRE(sn)	İLK AĞIRLIK (gr)	SON AĞIRLIK (gr)	AĞIRLIKTAKİ DEĞİŞİM (gr)
1	1,5	15	2	23,2427	23,2425	0,0002
2	1,5	15	5	22,3018	22,3012	0,0006
3	1,5	15	10	22,5056	22,5039	0,0017
4	1,5	15	20	22,7728	22,7699	0,0029
5	1,5	15	30	22,5748	22,5703	0,0045
6	1,5	30	2	22,5448	22,5443	0,0005
7	1,5	30	30	21,17	21,1628	0,0072
8	1,5	45	2	22,8303	22,83	0,0003
9	1,5	45	5	22,5287	22,5275	0,0012
10	1,5	45	10	22,0687	22,0664	0,0023
11	1,5	45	20	22,4793	22,4743	0,005
12	1,5	45	30	22,5425	22,5351	0,0074
13	1,5	60	2	22,6728	22,6724	0,0004
14	1,5	60	30	22,8153	22,809	0,0063
15	1,5	75	2	22,9607	22,9607	0
16	1,5	75	30	22,0489	22,0443	0,0046
17	1,5	90	2	20,4723	20,4723	0
18	1,5	90	5	22,5944	22,5943	0,0001
19	1,5	90	10	22,2972	22,2962	0,001
20	1,5	90	20	22,9477	22,9452	0,0025
21	1,5	90	30	22,4085	22,4044	0,0041



Şekil 5.1. 1,5 bar basınçta farklı açı değerleri için ağırlık kaybının kumlama süresi ile değişimi.

Tablo 5.2. 3 bar basınç altında yapılan kumlama sonuçları.

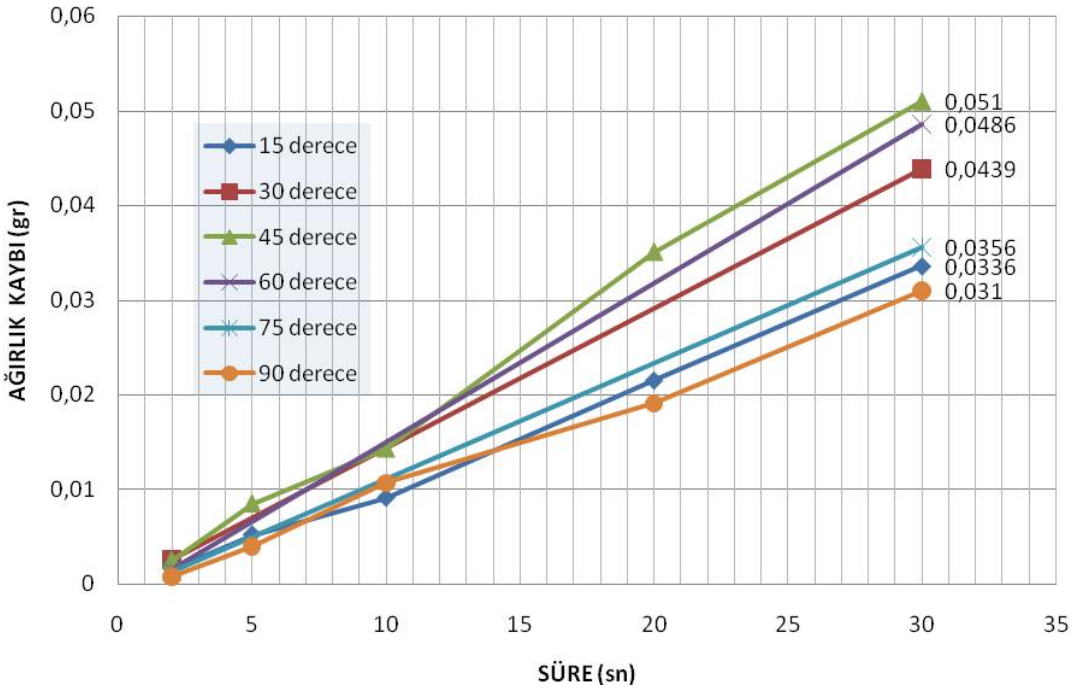
NUMUNE NO	BASINÇ (bar)	AÇI (°)	SÜRE(sn)	İLK AĞIRLIK (gr)	SON AĞIRLIK (gr)	AĞIRLIKTAKİ DEĞİŞİM (gr)
22	3	15	2	21,4953	21,4943	0,001
23	3	15	5	21,8781	21,8759	0,0022
24	3	15	10	23,1914	23,1865	0,0049
25	3	15	20	23,0478	23,0379	0,0099
26	3	15	30	22,4282	22,4137	0,0145
27	3	30	2	22,8194	22,8184	0,001
28	3	30	30	22,2229	22,1985	0,0244
29	3	45	2	22,7672	22,7659	0,0013
30	3	45	5	22,8717	22,8678	0,0039
31	3	45	10	21,0698	21,0615	0,0083
32	3	45	20	23,4646	23,4465	0,0181
33	3	45	30	22,284	22,2582	0,0258
34	3	60	2	22,825	22,824	0,001
35	3	60	30	21,203	21,1802	0,0228
36	3	75	2	22,7085	22,7081	0,0004
37	3	75	30	22,3971	22,377	0,0201
38	3	90	2	22,2498	22,2494	0,0004
39	3	90	5	21,9028	21,9013	0,0015
40	3	90	10	22,9241	22,9193	0,0048
41	3	90	20	22,053	22,0422	0,0108
42	3	90	30	22,746	22,7295	0,0165



Şekil 5.2. 3 bar basınçta farklı açı değerleri için ağırlık kaybının kumlama süresi ile değişimi.

Tablo 5.3. 5 bar basınç altında yapılan kumlama sonuçları.

NUMUNE NO	BASINÇ (bar)	AÇI (°)	SÜRE(sn)	İLK AĞIRLIK (gr)	SON AĞIRLIK (gr)	AĞIRLIKTAKİ DEĞİŞİM (gr)
43	5	15	2	22,7072	22,7056	0,0016
44	5	15	5	22,4387	22,4335	0,0052
45	5	15	10	22,3488	22,3397	0,0091
46	5	15	20	22,3558	22,3343	0,0215
47	5	15	30	22,2615	22,2279	0,0336
48	5	30	2	21,7718	21,7692	0,0026
49	5	30	30	22,9362	22,8923	0,0439
50	5	45	2	22,881	22,8785	0,0025
51	5	45	5	22,6426	22,6341	0,0085
52	5	45	10	22,4207	22,4064	0,0143
53	5	45	20	22,7307	22,6956	0,0351
54	5	45	30	21,2815	21,2305	0,051
55	5	60	2	23,182	23,1805	0,0015
56	5	60	30	23,3299	23,2813	0,0486
57	5	75	2	22,8509	22,8496	0,0013
58	5	75	30	22,2015	22,1659	0,0356
59	5	90	2	21,9451	21,9443	0,0008
60	5	90	5	22,5312	22,5272	0,004
61	5	90	10	22,3311	22,3204	0,0107
62	5	90	20	22,3033	22,2842	0,0191
63	5	90	30	22,2462	22,2152	0,031



Şekil 5.3. 5 bar basınçta farklı açı değerleri için ağırlık kaybının kumlama süresi ile değişimi.

Tablo ve şekiller dikkatli, incelendiğinde; bekleneceği gibi 30 sn süren kumlamalarda diğerlerinden daha fazla aşınmanın meydana geldiği görülebilmektedir. Tüm basınç değerlerinde en yüksek aşınma 45 derecelik çarpma açısının kullanıldığı kumlamada elde edilmiştir. En düşük aşınma ise 1,5 ve 5 bar kumlamada 90 derecelik çarpma açısında, 3 bar kumlamada ise 15 derecelik çarpma açısında meydana gelmiştir.

Şekillerde süre arttıkça ağırlık kaybı değerlerinde lineer bir artış olduğu gözlenmektedir. Ayrıca şekillerdeki eğrilerin sıralarının benzer olduğu ve 45, 30, 60 dereceler ile 75, 15, 90 derecelerin gruplaşırcasına ayrıldıkları görülebilmektedir.

Tablo 5.4'de her açı değerinde ölçülen Ra ve Ry pürüzlülük değerleri ve EDS analizi sonucunda elde edilen kumlama sonrası titanyum plakalara gömülen silisyum oranını görülmektedir. Şekil 5.4 ve Şekil 5.5 incelendiğinde açı değerinin artışı ile numuneye saplanan kum miktarının ve pürüzlülük değerlerinin de arttığı gözlenmektedir.

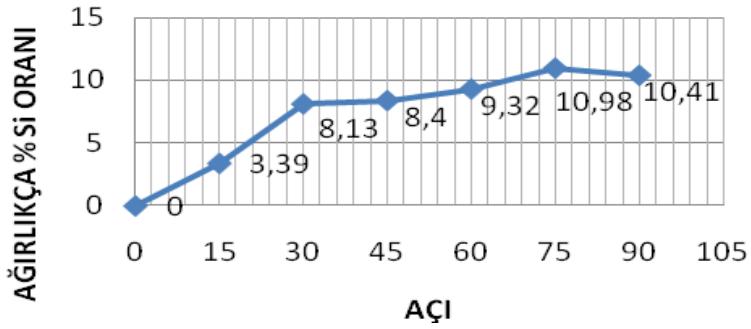
Tablo 5.4. Ra, Ry ve % Si değerleri.

Açı (°)	Ra (µm)	Ry (µm)	%Si
kumlanmamış	0,75	4,51	0
15	1,3	8,61	3,39
30	2,24	14,14	8,13
45	2,27	14,67	8,4
60	2,26	14,68	9,32
75	2,32	13,92	10,98
90	2,38	15,28	10,41

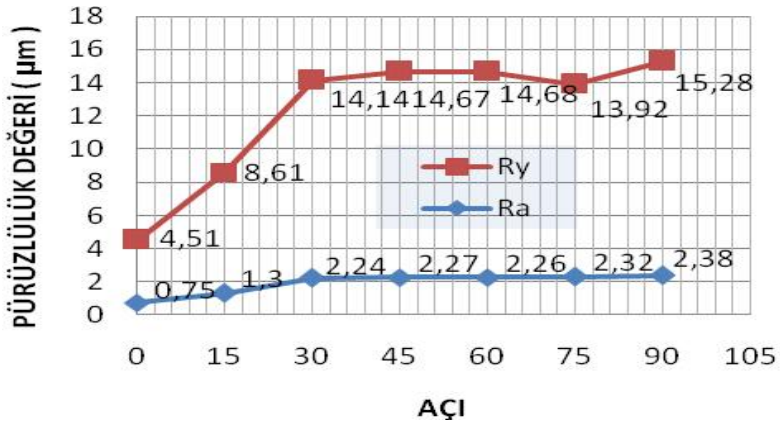
Ra- Ortalama Pürüzlülük: pürüzlülük profili ve onun ortalama çizgisi arasındaki mesafedir.

Ry- Tek kademe içerisindeki maksimum pürüzlülük yüksekliğidir.

%Si- Yüzeyde bulunan Si ağırlığı oranıdır.

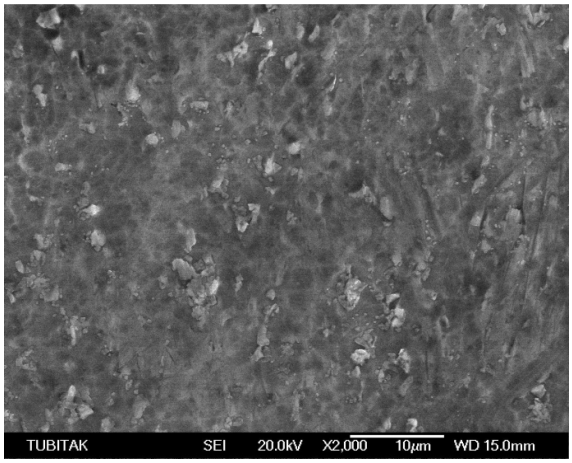


Şekil 5.4. Değişen açının % Si oranına göre değişim grafiği.

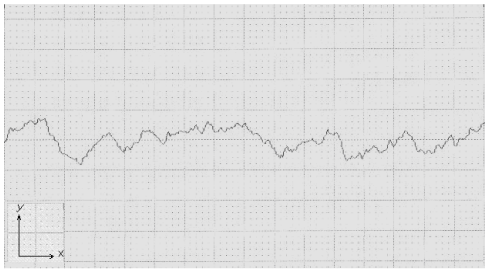


Şekil 5.5. Değişen açının pürüzlülük değerleri Ra ve Ry ‘ye göre değişim grafiği.

Çalışmanın bu kısımda 5 bar basınç ve 30 sn‘lik erozyon sonrası elde edilen değerleri ve görüntüleri üzerinden, kumlamanın titanyum alaşımı numuneleri yüzeylerinde ne gibi sonuçlar verdiği anlatılacaktır. Şekil 5.6’daki SEM görüntüsü ve pürüzlülük değerleri kumlanmamış numuneye aittir.



-a-

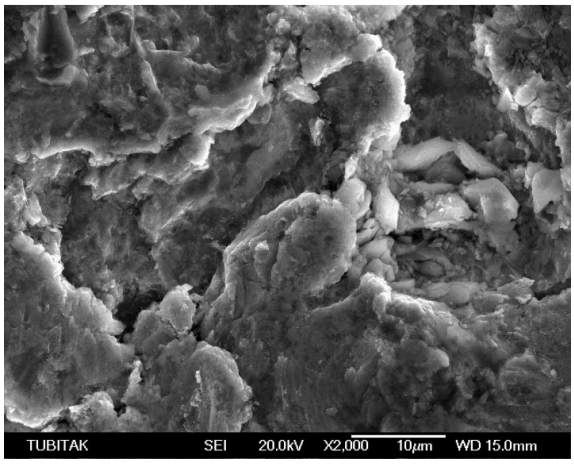


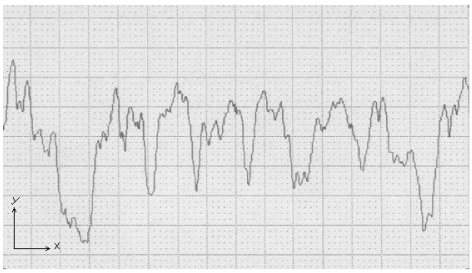
Ra=0,75
Ry=4,51

-b-

Şekil 5.6. Orijinal (kumlanmamış) malzeme, a- SEM görüntüsü, b- yüzey pürüzlülük profili.

En düşük ağırlık kaybı 90 derece açılı kumlamada gözlenmektedir. Bunun nedeni malzeme yüzeyine dik olarak püskürtülen kum taneciklerinin yüzeye çarparak sekmesi, yüzeyde plastik deformasyona neden olması ve numuneden malzeme koparamamasıdır. Numune üzerinde kumlamadan kaynaklanan göz ile görülebilecek küresel bir çukur oluşmuştur. SEM görüntüleri incelendiğinde kum tanelerinin yüzeyde derin çukurcuklar meydana getirdiği, hatta kum tanelerinin saplandığı ve yüzeyde kırıldığı gözlenmiştir (Şekil 5.7). Saplanan kum taneciklerinin oranı EDS analizi sonuçlarındaki % Si oranından da anlaşılabilmektedir (Tablo 5.4). Ayrıca yüzey pürüzlülüğü ölçümü sonuçlarından bu açı değerinde en pürüzlü numune yüzeyinin elde edildiği görülmektedir.



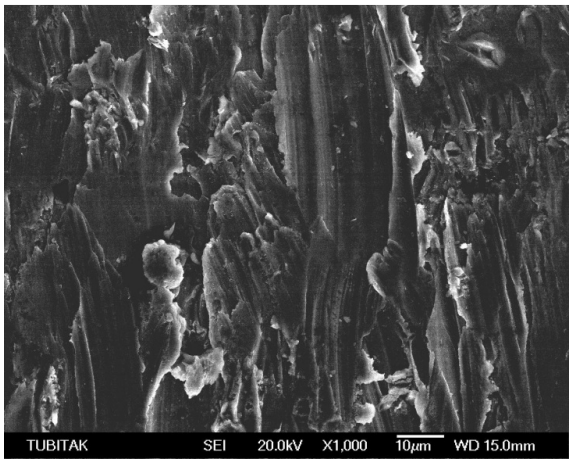


Ra=2,38
Ry=15,28

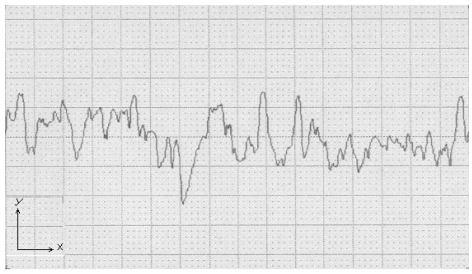
-a- **-b-**

Şekil 5.7. 90 derece açı ile kumlanmış malzeme, a- SEM görüntüsü, b- yüzey pürüzlülük değeri.

Ağırlık kaybı bakımından 90 derecelik kumlamaya benzer sonuçlar 15 derecelik kumlamada da ölçülmüştür. Yataya yakın bir açı ile püskürtme yapıldığından kum tanecikleri malzeme yüzeyi ile daha az temas ederek uzaklaşmıştır. Düşük açılı kumlama numuneden çok az parça koparılmasına neden olmuştur. Yataya yakın kumlamanın numune yüzey alanında geniş bir etki alanına sahip olduğu fakat çukur oluşmadığı gözlenmiştir. SEM görüntüleri incelendiğinde (Şekil 5.8) kum taneciklerinin numune yüzeyini, kumlamanın yapıldığı doğrultuda çizdiği çok net görülmektedir. Açının düşük olması partiküllerin yüzeye saplanmasına olanak sağlamamıştır. Yapılan EDS analizlerinin sonuçlarından da anlaşılacağı üzere diğer kumlama açılarına kıyasla Si oranı 15 derecelik kumlamada ölçülmüştür. Ayrıca yüzey pürüzlülüğü incelendiğinde diğer açılı kumlamaların çok altında bir değerde olduğu ve kumlanmamış numunenin pürüzlülük değerine yakın olduğu görülmüştür.



-a-

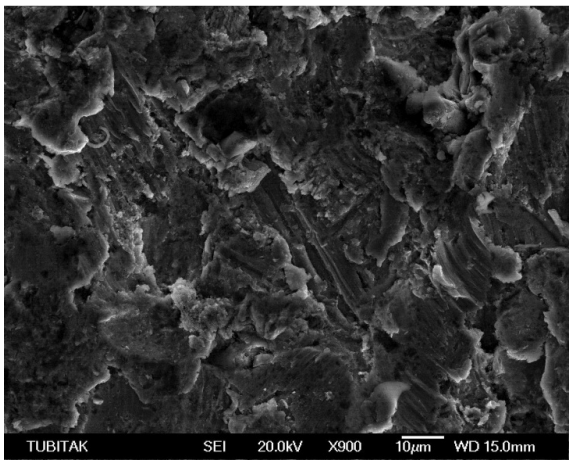


Ra=1,30
Ry=8,61

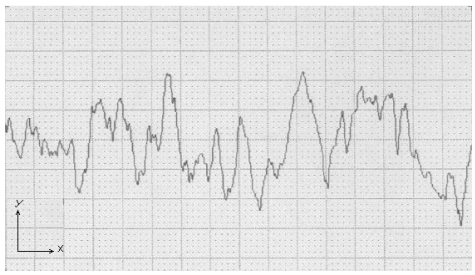
-b-

Şekil 5.8. 15 derece açı ile kumlanmış malzeme, a- SEM görüntüsü, b- yüzey pürüzlülük değeri.

Tablo 5.3 ve Şekil 5.3'teki değerlere baktığımızda en yüksek ağırlık kaybının 45 derecelik kumlama sonucu meydana geldiği ve bu kumlamada açı değerinin hem numuneden malzeme koparacak kadar, hem de kum taneciklerinin yüzeye saplanacağı kadar yeterli eğime sahip olduğu görülmektedir. Kumlama sonrası numune yüzeyinde geniş bir yüzey deformasyonu ile birlikte elips şeklinde bir çukurlaşma gözlenmiştir. Yapılan EDS analizlerinde yüksek bir Si oranıyla karşılaşılmıştır. SEM görüntüleri incelendiğinde (Şekil 5.9) kum taneciklerinin yüzeyi çizerek numuneyi aşındırdığı ve bazı bölgelerde partiküllerin yüzeye saplandığı gözlenmiştir. Pürüzlülük ölçümü sonucu Tablo 5.4 'de de görüldüğü gibi yakın açılarda yapılan diğer kumlamalara benzer sonuçlar ortaya çıkmıştır.



-a-

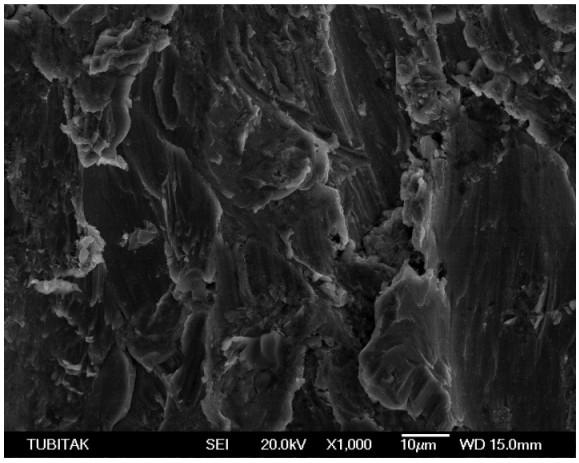


Ra=2,27
Ry=14,67

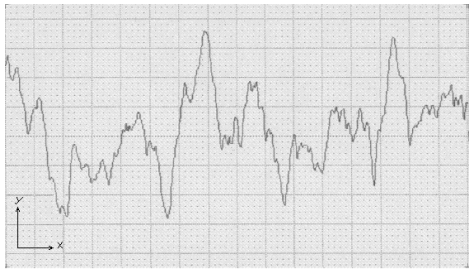
-b-

Şekil 5.9. 45 derece açı ile kumlanmış malzeme, a- SEM görüntüsü, b- yüzey pürüzlülük değeri.

30, 60 ve 75 derece açı ile yapılan kumlamalardan alınan sonuçlar diğer kumlama açılarından alınan değerlerin arasında değerler vermiştir. 30 derece ile yapılan kumlamada Şekil 5.3'te de görüldüğü gibi diğer değerlerin ortalamasına benzer bir sonuç ortaya çıkmıştır. Her ne kadar 45 ve 60 derece kadar olmasa da dikkate değer ağırlık kaybı meydana gelmiştir. Kumlama sonrası malzeme yüzeyinde oluşan deformasyonla birlikte çok küçükte olsa çukurlaşma gözlenmektedir. SEM görüntüleri incelendiğinde (Şekil 5.10) kum taneciklerinin yüzeyi çizerek aşındırdığı gözlenmektedir. EDS analizinde ise 45 dereceye yakın bir Si oranı görülmüştür. Ayrıca pürüzlülük değeri de Tablo 5.4 'de görülebileceği gibi 45 ve 60 dereceli kumlama numunelerinin pürüzlülük değerlerine yakın bir değerde ölçülmüştür.



-a-

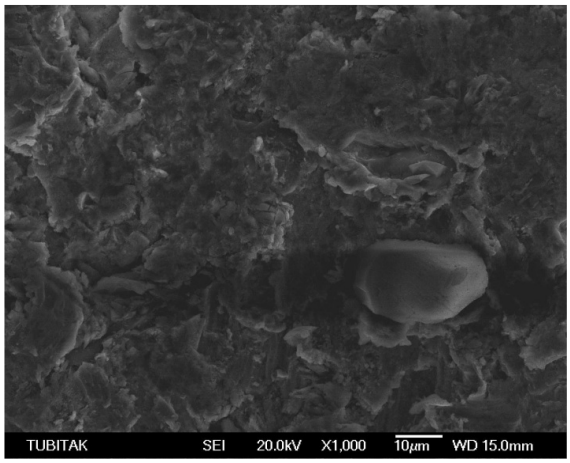


Ra=2,24
Ry=14,14

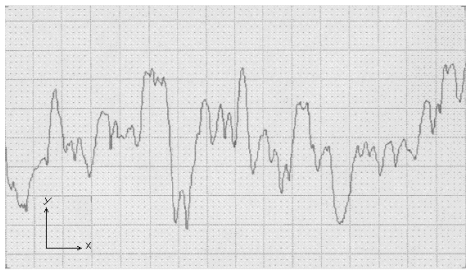
-b-

Şekil 5.10. 30 derece açı ile kumlanmış malzeme, a- SEM görüntüsü, b- yüzey pürüzlülük değeri.

60 derece açı ile yapılan kumlamada ciddi bir ağırlık kaybı ortaya çıkmıştır; ama açı değeri 45 dereceli kumlamada elde edildiği kadar kum taneciklerinin yüzeyden malzeme koparmasına yetmemiştir. Kumlama sonrası numune yüzeyinde geniş bir yüzey deformasyonu ile birlikte küçük elips şeklinde bir çukurlaşma gözlenmiştir. SEM görüntülerinden, yüzeyde çizilmelerin azalmasına rağmen yüzeye saplanan tanecik miktarının arttığı görülmüştür (Şekil 5.11). EDS analizi sonuçları da yüzeye saplanan Si partiküllerinin 45 derecede incelenenden fazla olduğunu doğrulamaktadır. Daha önce de bahsedildiği üzere 30, 45 ve 60 dereceli kumlamanın pürüzlülük değerlerinin benzer sonuçlar verdiği Tablo 5.4 'de görülmektedir.



-a-

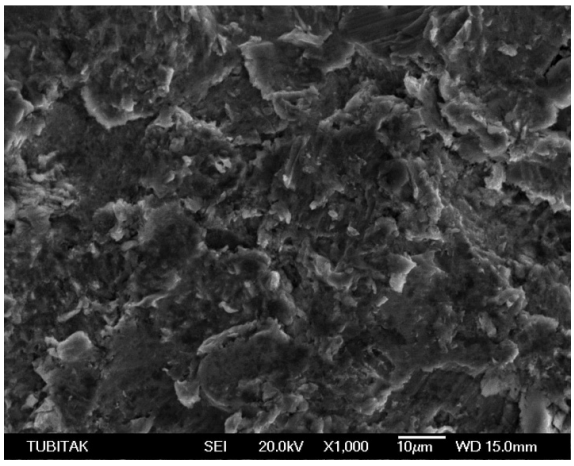


Ra=2,26
Ry=14,68

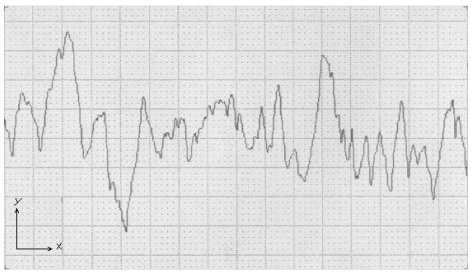
-b-

Şekil 5.11. 60 derece açı ile kumlanmış malzeme, a- SEM görüntüsü, b- yüzey pürüzlülük değeri.

Şekil 5.3 incelendiğinde 75 dereceli kumlama işleminde 15 ve 90 dereceli kumlamalardan bir miktar fazla malzeme aşındırdığı fakat diğer derecelerin çok altında olduğu görülmüştür. Ayrıca malzeme yüzey deformasyonu 90 derecede gözlendiği gibi, dairesel deformasyonun yanı sıra küresele yakın bir çukur oluşmuştur. SEM görüntüleri incelendiğinde kum tanelerinin yüzeyde derin çukurcuklar meydana getirdiği ve saplanan kum tanelerinin kırıldığı gözlenmiştir (Şekil 5.12). Yapılan EDS analizinde tüm derecelerdeki kumlamalardan daha fazla Si oranına sahip olduğu görülmüştür, buradan yüzeye saplanan kum taneciklerinin bu açı değerinde diğerlerinden daha fazla olduğunu söylenebilir. Ayrıca ölçülen pürüzlülük değeri 90 dereceli kumlamaya yakın bir değer verdiği Tablo 5.4 'de görülmektedir.



-a-



Ra=2,32
Ry=13,92

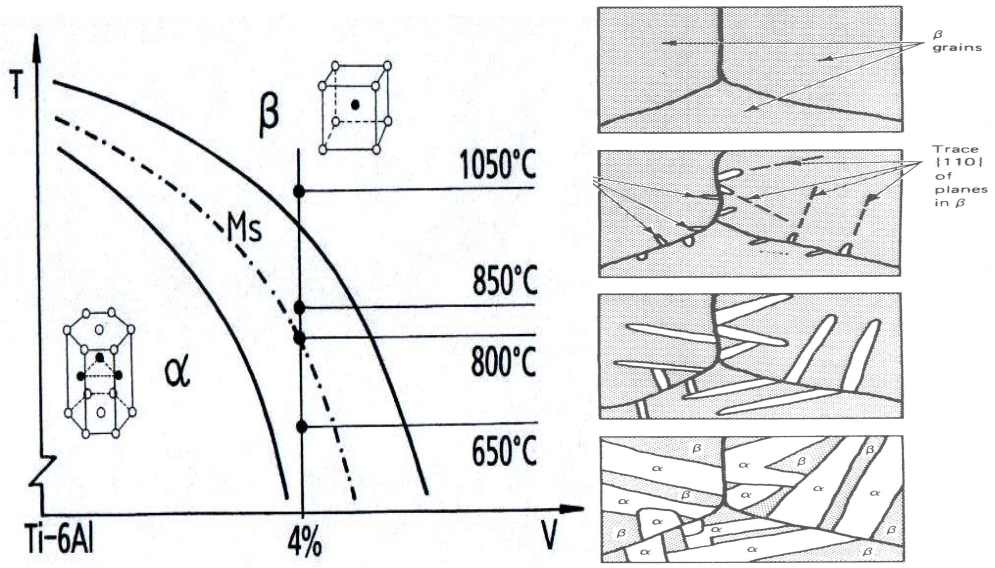
-b-

Şekil 5.12. 75 derece açı ile kumlanmış malzeme, a- SEM görüntüsü, b- yüzey pürüzlülük değeri.

5.2. Isıl İşlem Çalışması Bulguları

5.2.1. Isıl işlemler sonrası mikroyapıda oluşan değişikler

Şekil 5.13'den de anlaşılabileceği gibi oda sıcaklığında α+β kristal yapısına sahip numuneler 1050 °C'de 1 saat bekletildiğinde β kristal yapısına dönüşürler. Numunelere suda, havada veya fırında soğutma yapıldığında çeşitli mikro yapı değişiklikleri meydana gelir.

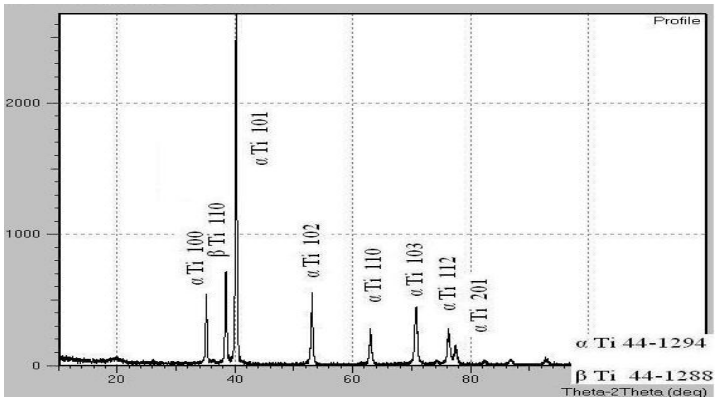


Şekil 5.13. Ti - % 6 Al faz diyagramı ile Ti6Al4V alaşımında meydana gelen değişiklikler.

a -- Isıl işlemsiz Orijinal Numune: Ticari olarak yurt dışından alınan ve Tablo 4.1'de bileşimi verilen, herhangi bir ısıl işlem uygulanmamış numuneye ait görüntü Şekil 5.14'de verilmiştir. Numune oda sıcaklığında α+β kristal yapısına sahiptir. Numuneye ait XRD sonucu Şekil 5.15'de görülmektedir.

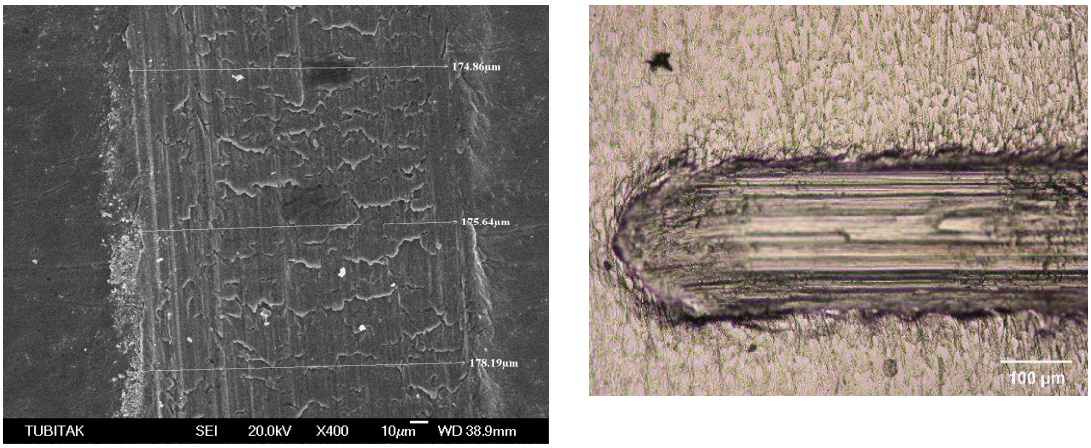


Şekil 5.14. Isıl işlemsiz numunenin optik mikroyapı görüntüsü.



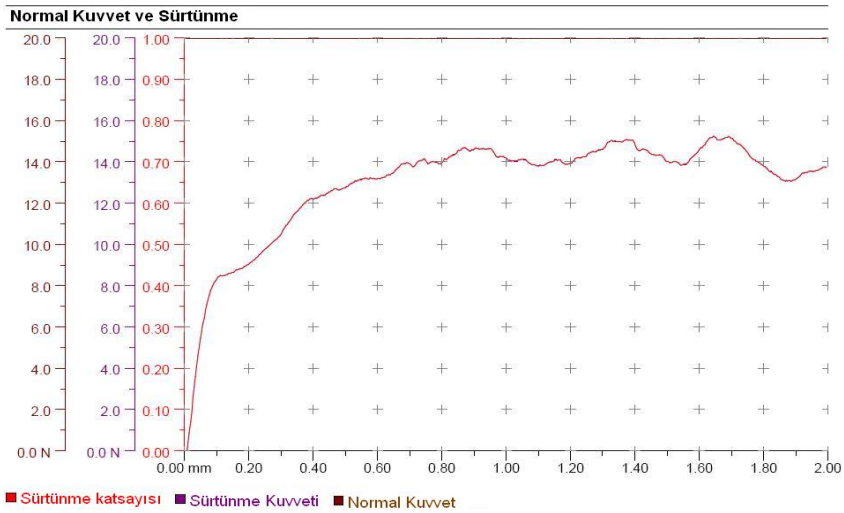
Şekil 5.15. Isıl işlemsiz numunenin XRD sonucu.

Numuneler üzerine scratch test (yüzey çizilme dayanımı testi) cihazı ile oluşturulan izin ortalama kalınlığı Şekil 5.16-a'daki SEM görüntüsünden 176,23 µm olarak ölçülmüştür. Optik ve SEM görüntüleri incelendiğinde (Şekil 5.16-a,b) düzgün ve kalın bir çizilme izi görülmektedir. İzin kenarlarında hiç yığılma görülmezken çok küçük enine çatlaklar göze çarpmaktadır. Çizilme izinin bitiş ucunda çok fazla malzeme birikmesi meydana gelmiş ve iç kısımlarda ve kenarlarda malzeme kopması gözlenmektedir. Şekil 5.17'de numuneye uygulanan scratch test sonuçlarının çıktısı görülmektedir. Bu sonuçlardan sürtünme katsayısı yaklaşık 0,71 ve nüfuziyet derinliği yaklaşık 35450 nm olarak ölçülmüştür.

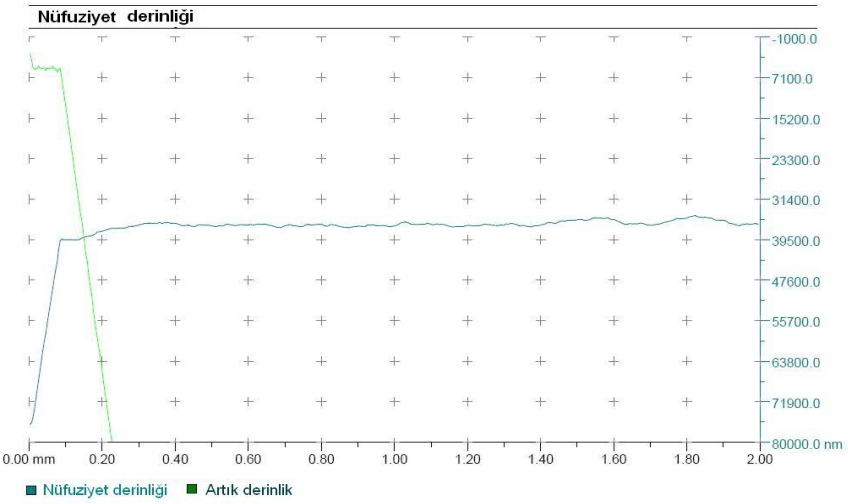


-a- -b-

Şekil 5.16. Isıl işlemsiz orijinal numunede oluşan çizilme izinin (a) optik ve (b) SEM görüntüsü.



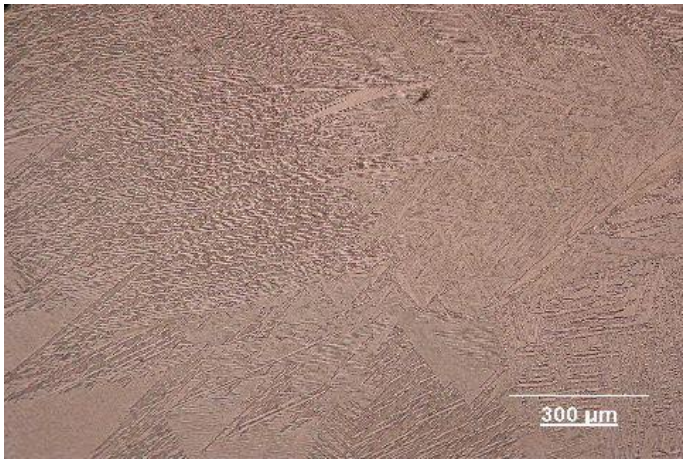
-a-



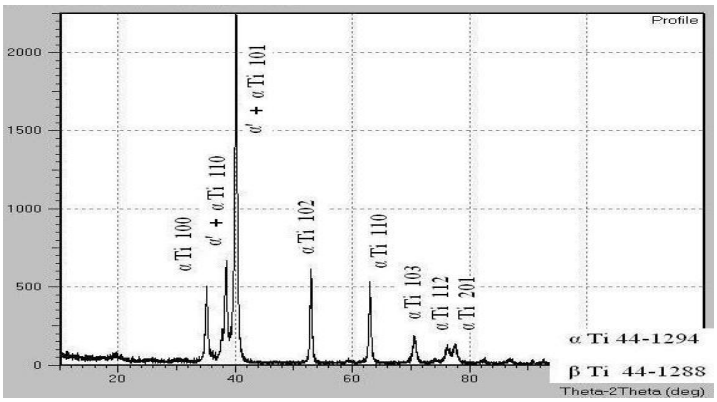
-b-

Şekil 5.17. Isıl işlemsiz orijinal numunenin yüzey çizilme dayanımı testi sonuçları a) sürtünme, b)derinlik.

b -- Numune 1: Ti6Al4V alaşımı oda sıcaklığından 1050 ^{o}C'ye kadar ısıtılıp bu sıcaklıkta 1 saat bekletildiğinde tüm yapı β fazına dönüşmüştür (Şekil 5.13). Süre sonunda numune fırından çıkarılıp suya daldırılarak su verme işlemi yapıldığında yapı tamamen Şekil 5.18'de görüleceği gibi α` fazına (titanyum martenzite) dönüşmüştür. α` ifadesi aşırı doymuş sıkı paket hegzagonal (SPH) fazını temsil etmektedir. Bu martenzitin yapısı SPH kristal yapısına sahip yoğun ikizlenmiş iğnesel plakalardan oluşmuştur. Yapının hacim merkez kübikten (HMK) sıkı paket hegzagonale (SPH) dönüşü ile artan dislokasyan yoğunluğu mukavemet, sertlik ve yüzey çizilme dayanımlarında artışlara neden olmuştur. Numuneye ait XRD sonucu Şekil 5.19'da görülmektedir.



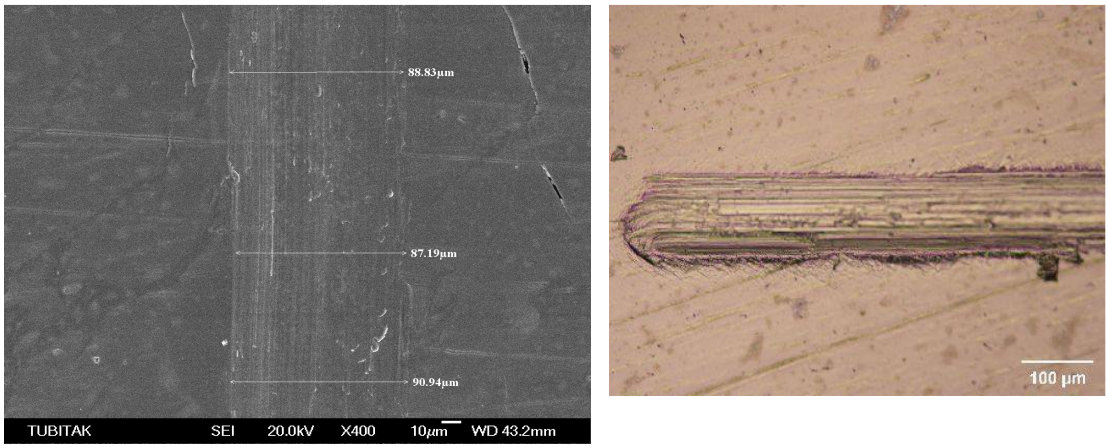
Şekil 5.18. Numune 1'in optik mikroyapı görüntüsü.



Şekil 5.19. Numune 1'in XRD sonucu.

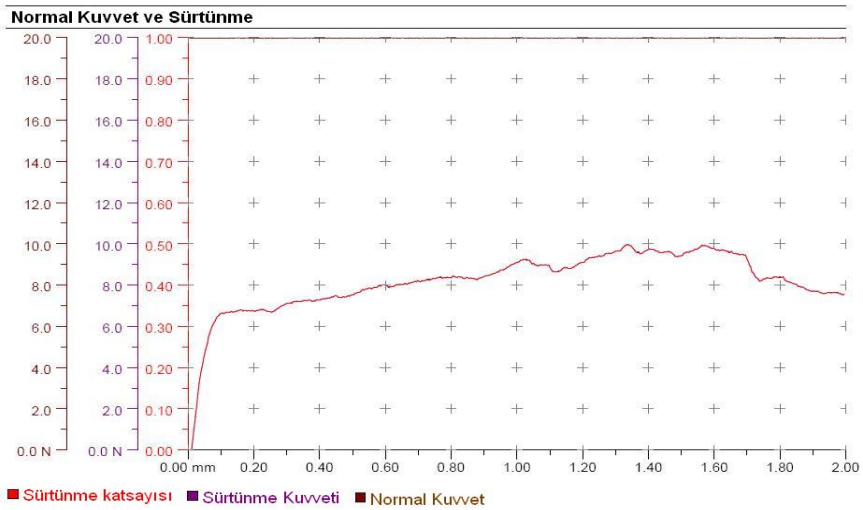
Numuneler üzerine scratch test (yüzey çizilme dayanımı testi) cihazı ile oluşturulan izin ortalama kalınlığı Şekil 5.20-a 'daki SEM görüntüsünden 88,98 µm olarak

ölçülmüştür. Optik ve SEM görüntüleri incelendiğinde (Şekil 5.20-a,b) ince ve düzgün bir çizilme izi görülmektedir. İzin kenarlarında az bir yığılma ile birlikte çok küçük çatlaklar görülmektedir. Çizilme izinin bitiş ucunda birikme meydana gelmezken iç kısımlarda malzeme kopmaları gözlenmektedir. Şekil 5.21'de numuneye uygulanan scratch test sonuçlarının çıktısı görülmektedir. Bu sonuçlardan sürtünme katsayısı yaklaşık 0,42 ve nüfuziyet derinliği yaklaşık 19300 nm olarak ölçülmüştür.



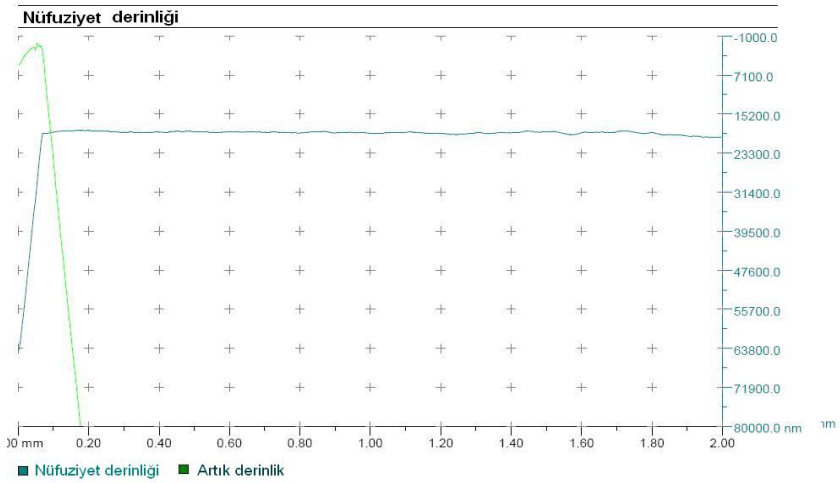
-a- -b-

Şekil 5.20. Numune 1'de oluşan çizilme izinin (a) optik ve (b) SEM görüntüsü.



-a-

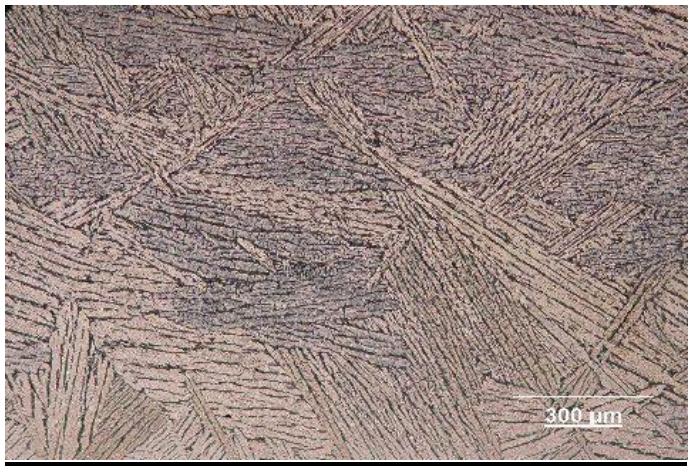
Şekil 5.21. Numune 1'in yüzey çizilme dayanımı testi sonuçları
a) sürtünme, b)derinlik.



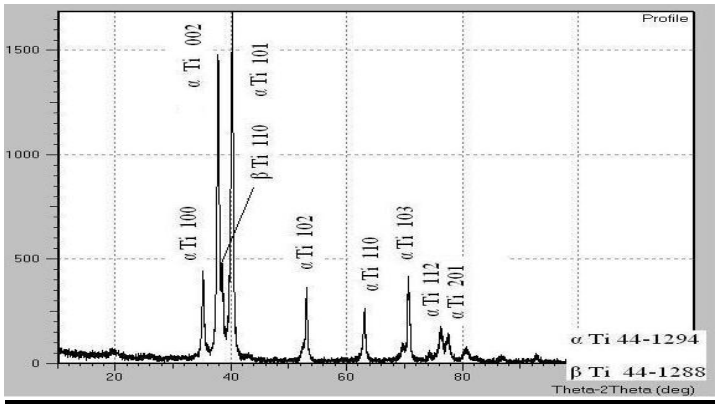
-b-

Şekil 5.21. (Devam) Numune 1'in yüzey çizilme dayanımı testi sonuçları
a) sürtünme, b)derinlik.

c -- Numune 2: Ti6Al4V alaşımına, oda sıcaklığından 1050 ^{o}C'ye kadar ısıtılıp bu sıcaklıkta 1 saat bekletildikten sonra durgun havada soğutma işlemi gerçekleştirilmiştir. Havada soğuma sayesinde, çekirdeklenme ve büyüme ile β fazından dönüşmüş, iğnesel α'lardan meydana gelen bir yapı oluşmuştur (Şekil 5.22). Numuneye ait XRD sonucu Şekil 5.23 'de görülmektedir.

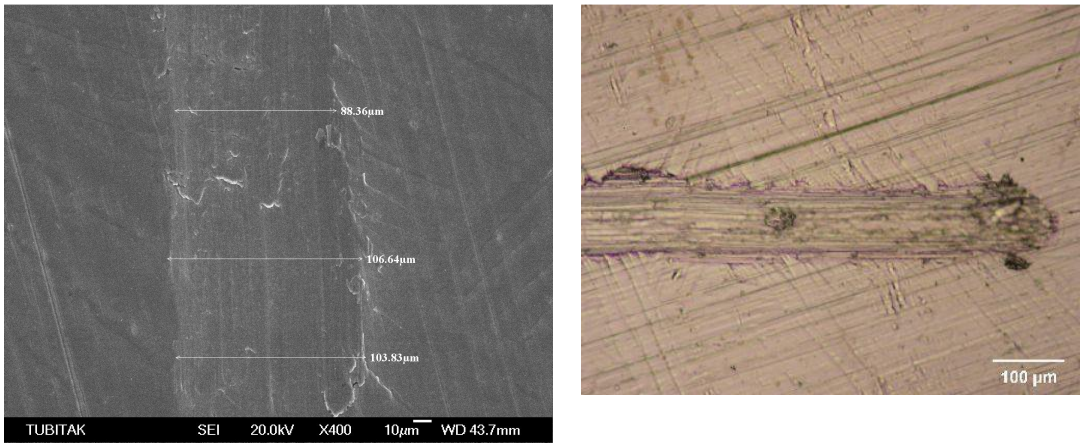


Şekil 5.22. Numune 2'in optik mikroyapı görüntüsü.



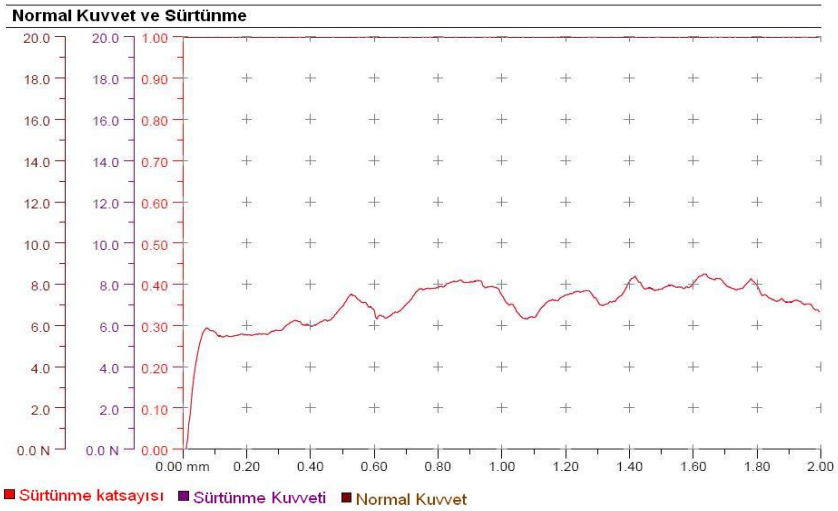
Şekil 5.23. Numune 2'nin XRD sonucu

Numuneler üzerine scratch test (yüzey çizilme dayanımı testi) cihazı ile oluşturulan izin ortalama kalınlığı Şekil 5.24-a'daki SEM görüntüsünden 99,61 µm olarak ölçülmüştür. Optik ve SEM görüntüleri incelendiğinde (Şekil 5.24-a,b) düzgün olmayan bir çizilme izi görülmektedir. İzin kenarlarında bir miktar yığılma ile birlikte çok küçük çatlaklar görülmektedir. Çizilme izinin bitiş ucunda çok miktarda birikmenin meydana geldiği, iç kısımlarda ve kenarlarda malzeme kopmalarının oluştuğu gözlenmektedir. Şekil 5.25'de numuneye uygulanan scratch test sonuçlarının çıktısı görülmektedir. Bu sonuçlardan sürtünme katsayısı yaklaşık 0,38 ve nüfuziyet derinliği yaklaşık 19200 nm olarak ölçülmüştür.

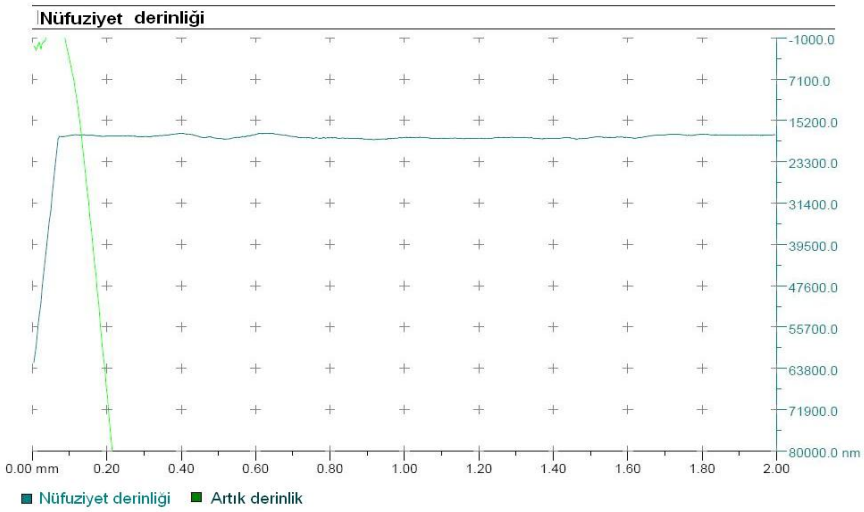


-a- -b-

Şekil 5.24. Numune 2'de oluşan çizilme izinin (a) optik ve (b) SEM görüntüsü.



-a-



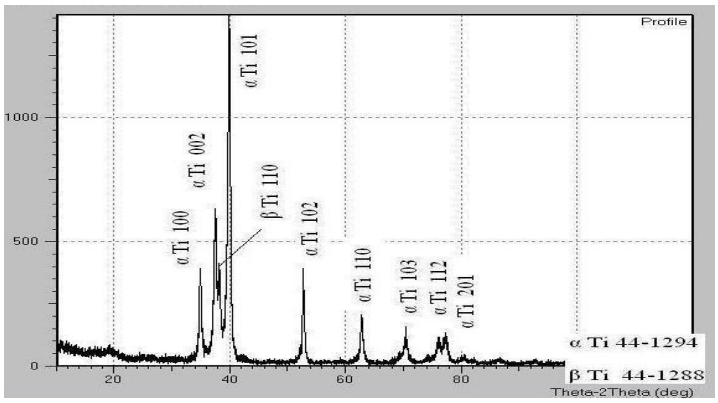
-b-

Şekil 5.25. Numune 2'nin yüzey çizilme dayanımı testi sonuçları
a) sürtünme, b)derinlik.

d -- Numune 3: Ti6Al4V alaşımına, oda sıcaklığından 1050 ^{o}C'ye kadar ısıtılıp bu sıcaklıkta 1 saat bekletildikten sonra fırın içerinde soğutma işlemi gerçekleştirilmiştir. Fırında soğuma ile dengeye daha yakın bir yapı meydana gelmiştir. Sonuç olarak kaba plaka şeklinde α yapısı, çekirdeklenme ve büyüme ile oluşur. Yavaş soğumadan dolayı bir miktar β fazı kalır ve tane sınırı oluşur (Şekil 5.26). Numuneye ait XRD sonucu Şekil 5.27 'de görülmektedir.

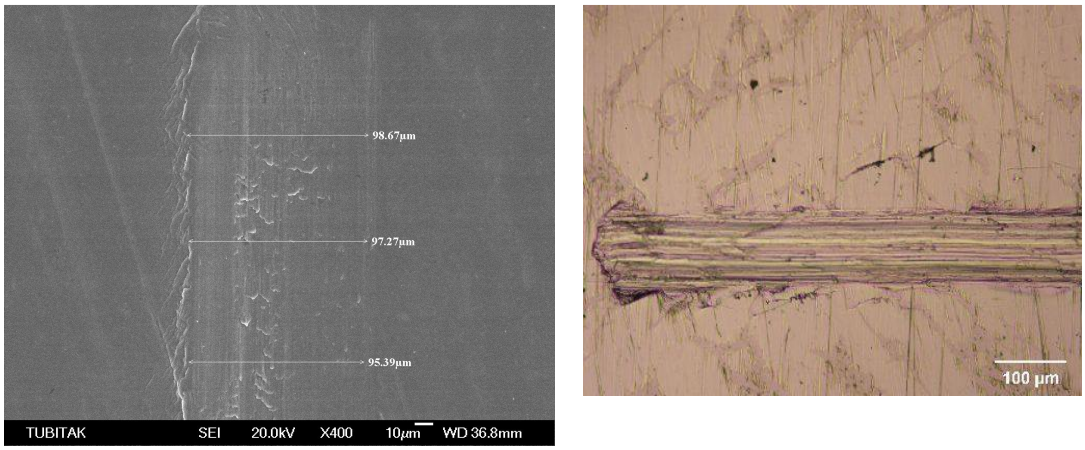


Şekil 5.26. Numune 3'in optik mikroyapı görüntüsü.



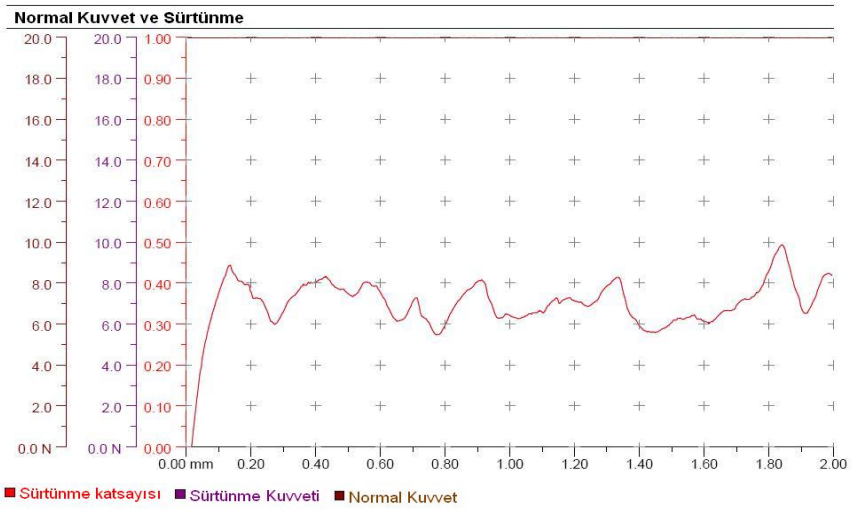
Şekil 5.27. Numune 3'ün XRD sonucu.

Numuneler üzerine scratch test (yüzey çizilme dayanımı testi) cihazı ile oluşturulan izin ortalama kalınlığı Şekil 5.28-a 'daki SEM görüntüsünden 97,11 µm olarak ölçülmüştür. Optik ve SEM görüntüleri incelendiğinde (Şekil 5.28-a,b) düzgün bir çizilme izi görülmektedir. İzin kenarlarında hiç yığılma görülmezken çok küçük çatlaklar görülmektedir. Çizilme izinin bitiş ucunda birikme meydana gelmezken iç kısımlarda ve uç kısma doğru malzeme kopmaları gözlenmiştir. Şekil 5.29'da numuneye uygulanan scratch test sonuçlarının çıktısı görülmektedir. Bu sonuçlardan sürtünme katsayısı yaklaşık 0,34 ve nüfuziyet derinliği yaklaşık 79650 nm olarak ölçülmüştür.

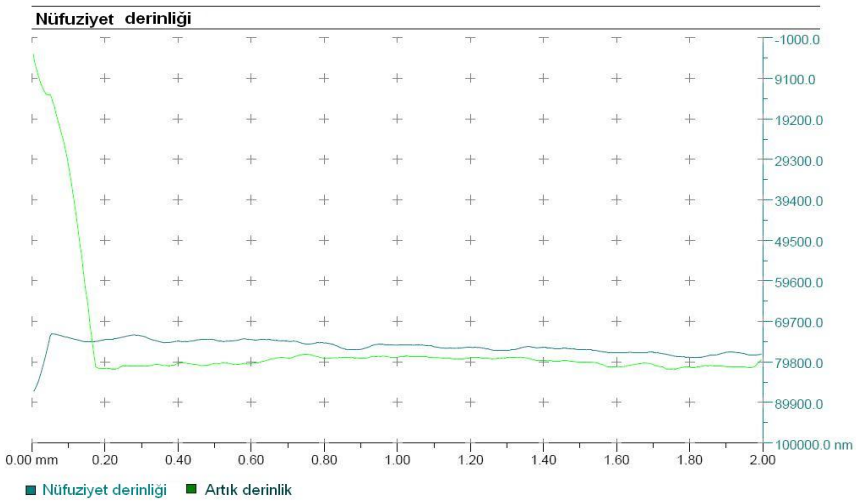


-a- -b-

Şekil 5.28. Numune 3'de oluşan çizilme izinin (a) optik ve (b) SEM görüntüsü.



-a-



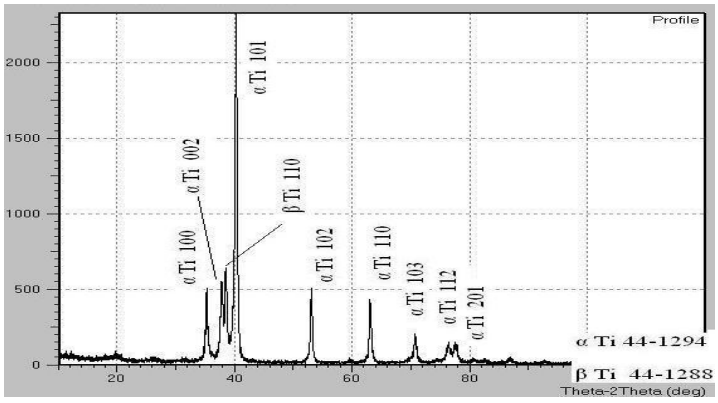
-b-

Şekil 5.29. Numune 3'ün yüzey çizilme dayanımı testi sonuçları
a) sürtünme, b)derinlik.

e -- Numune 4: Ti6Al4V alaşımına, oda sıcaklığından 1050 ^{o}C'ye kadar ısıtılıp bu sıcaklıkta 1 saat bekletildikten sonra suda soğutma işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu ısıl işlemden sonra numuneler oda sıcaklığından 550°C ye kadar ısıtılıp bu sıcaklıkta 2 saat bekletildikten sonra durgun hava ortamında soğumaya bırakılmıştır. Böylece ilk ısıl işlem aşamasında oluşturulan titanyum martenzitin yaşlandırılması (tavlanması) sağlanmış ve ince β fazı, alt tane sınırlarında dislokasyonlardan ve ikiz sınırlarındaki α` martanzitten çökelir (Şekil 5.30). Böylelikle yapılan sertlik testinin sonuçlarından da anlaşılacağı üzere bir miktar sertlik artışı sağlamıştır. Numuneye ait XRD sonucu Şekil 5.31 'de görülmektedir.



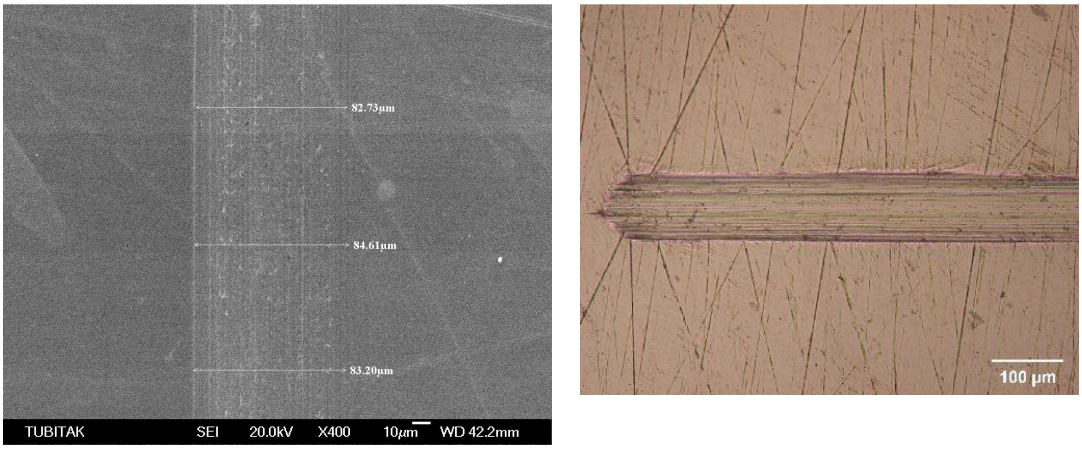
Şekil 5.30. Numune 4'ün optik mikroyapı görüntüsü.



Şekil 5.31. Numune 4'ün XRD sonucu.

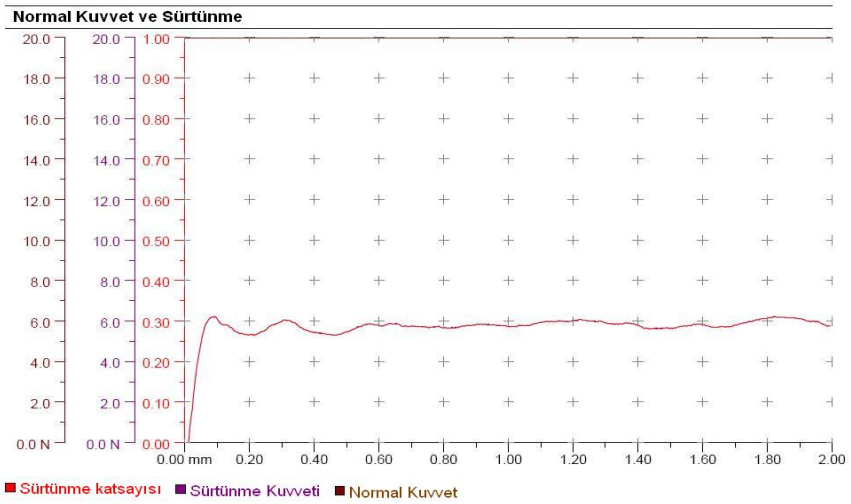
Numuneler üzerine scratch test (yüzey çizilme dayanımı testi) cihazı ile oluşturulan izin ortalama kalınlığı Şekil 5.32-a 'daki SEM görüntüsünden 83,51 µm olarak ölçülmüştür. Optik ve SEM görüntüleri incelendiğinde (Şekil 5.32-a,b) çok düzgün

bir çizilme izi görülmektedir. İzin kenarlarında hiç bir çatlak ve yığılma görülmemektedir. Çizilme izinin bitiş ucunda hiç birikme meydana gelmezken iç kısımda ve kenarlarda malzeme kopması gözlenmemiştir. Şekil 5.33'de numuneye uygulanan scratch test sonuçlarının çıktısı görülmektedir. Bu sonuçlardan sürtünme katsayısı yaklaşık 0,30 ve nüfuziyet derinliği yaklaşık 17400 nm olarak ölçülmüştür.



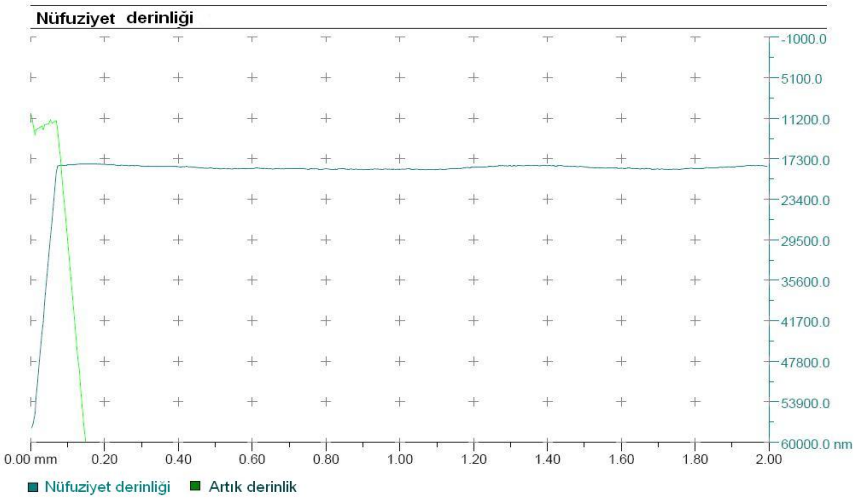
-a- -b-

Şekil 5.32. Numune 4'de oluşan çizilme izinin (a) optik ve (b) SEM görüntüsü.



-a-

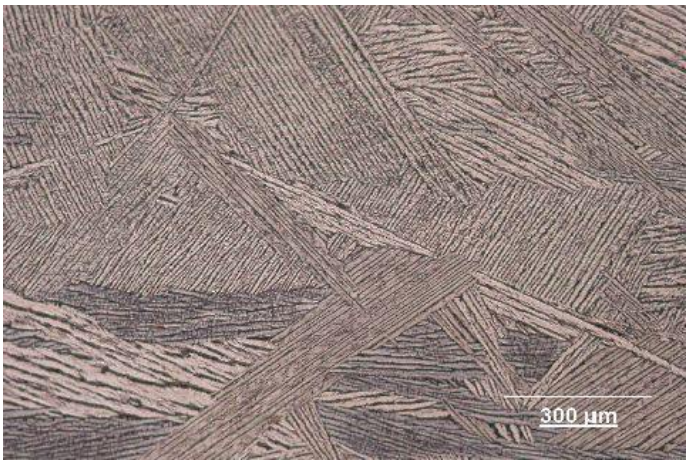
Şekil 5.33. Numune 4'ün yüzey çizilme dayanımı testi sonuçları
a) sürtünme, b)derinlik.



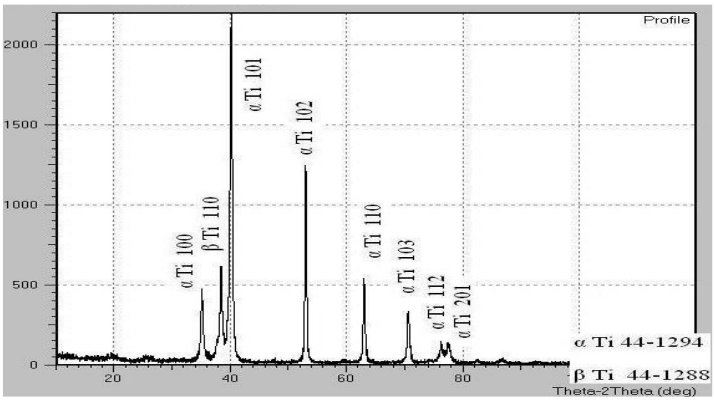
-b-

Şekil 5.33. (Devam) Numune 4'ün yüzey çizilme dayanımı testi sonuçları a) sürtünme, b)derinlik.

f -- Numune 5: Ti6Al4V alaşımına, oda sıcaklığından 1050 ^{o}C'ye kadar ısıtılıp bu sıcaklıkta 1 saat bekletildikten sonra havada soğutma işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu ısıl işlemden sonra numuneler oda sıcaklığından 550°C'ye kadar ısıtılıp bu sıcaklıktan 2 saat bekletildikten sonra durgun hava ortamında soğumaya bırakılmıştır. Yaşlanma ile iğnesel α plakalardan β fazı çökelmiştir. Bu sertlik küçük bir değişime neden olmuştur. Isıl işlem sonrası elde edilen mikro yapıya ait ışık mikroskobu görüntüsü Şekil 5.34 'de görülmektedir. Numuneye ait XRD sonucu Şekil 5.35 'de görülmektedir.

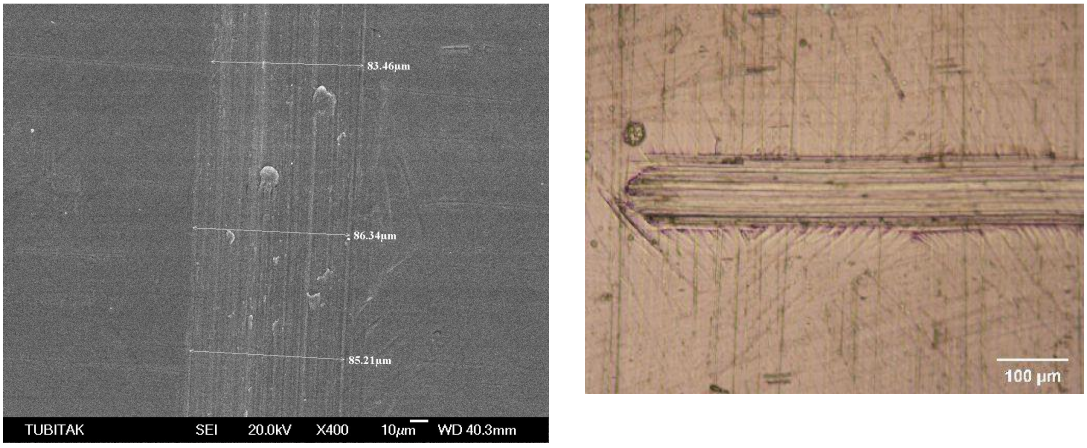


Şekil 5.34. Numune 5'in optik mikroyapı görüntüsü.



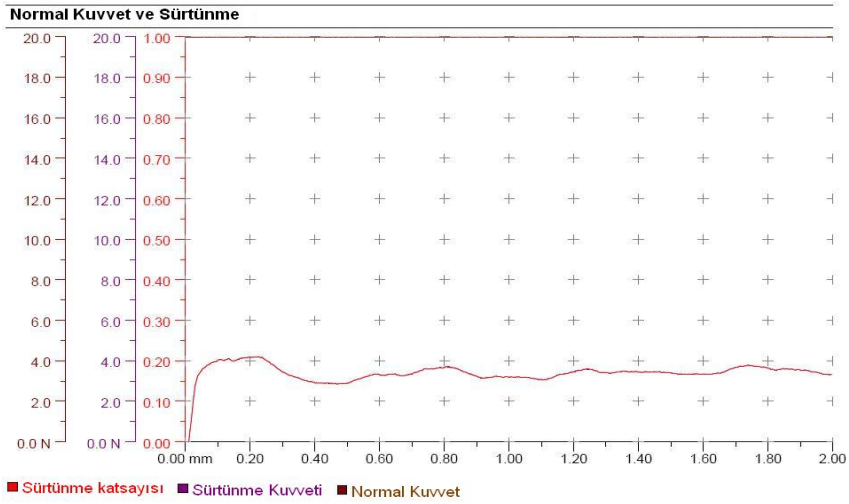
Şekil 5.35. Numune 5'in XRD sonucu.

Numuneler üzerine scratch test (yüzey çizilme dayanımı testi) cihazı ile oluşturulan izin ortalama kalınlığı Şekil 5.36-a 'daki SEM görüntüsünden 85 µm olarak ölçülmüştür. Optik ve SEM görüntüleri incelendiğinde (Şekil 5.36-a,b) düzgün bir çizilme izi görülmektedir. İzin kenarlarında hiçbir yığılma görülmezken çok fazla çatlak göze çarpmaktadır. Çizilme izinin bitiş ucunda birikmenin meydana gelmediği, iç kısımlarda ve kenarlarda malzeme kopmaları görülmemektedir. Şekil 5.37'de numuneye uygulanan scratch test sonuçlarının çıktısı görülmektedir. Bu sonuçlardan sürtünme katsayısı yaklaşık 0.19 ve nüfuziyet derinliği yaklaşık 35450 nm olarak ölçülmüştür.

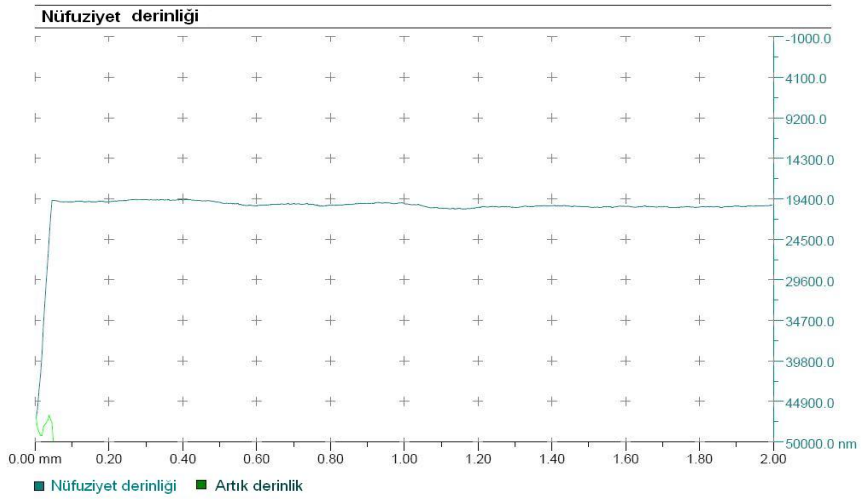


-a- -b-

Şekil 5.36. Numune 5'de oluşan çizilme izinin (a) optik ve (b) SEM görüntüsü.



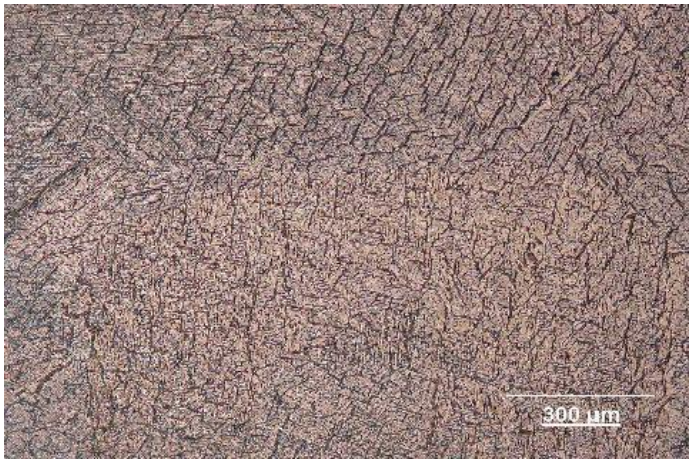
-a-



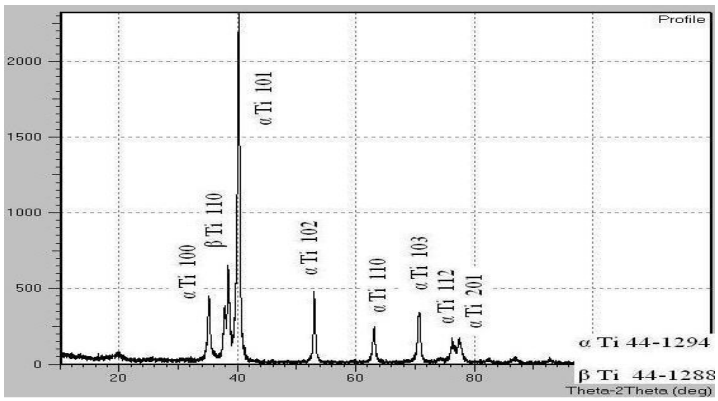
-b-

Şekil 5.37. Numune 5 ‘in yüzey çizilme dayanımı testi sonuçları
a) sürtünme, b)derinlik.

g -- Numune 6: Ti6Al4V alaşımına, oda sıcaklığından 1050 ^{o}C’ye kadar ısıtılıp bu sıcaklıkta 1 saat bekletildikten sonra suda soğuma işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu ısıl işlemden sonra numuneler oda sıcaklığından 550°C‘ye kadar ısıtılıp bu sıcaklıkta 8 saat bekletildikten sonra fırın ortamında soğumaya bırakılmıştır. Böylece ilk ısıl işlem aşamasında oluşturulan titanyum martenzitin yaşlandırılması ile ince β fazı, artan süre ile α` martanzitten daha çok çökelmiştir. Buda malzemenin daha homojen bir yapı oluşturmasını sağlar. Isıl işlem sonrası elde edilen mikro yapıya ait ışık mikroskobu görüntüsü Şekil 5.38’de görülmektedir. Numuneye ait XRD sonucu Şekil 5.39 ‘da görülmektedir.

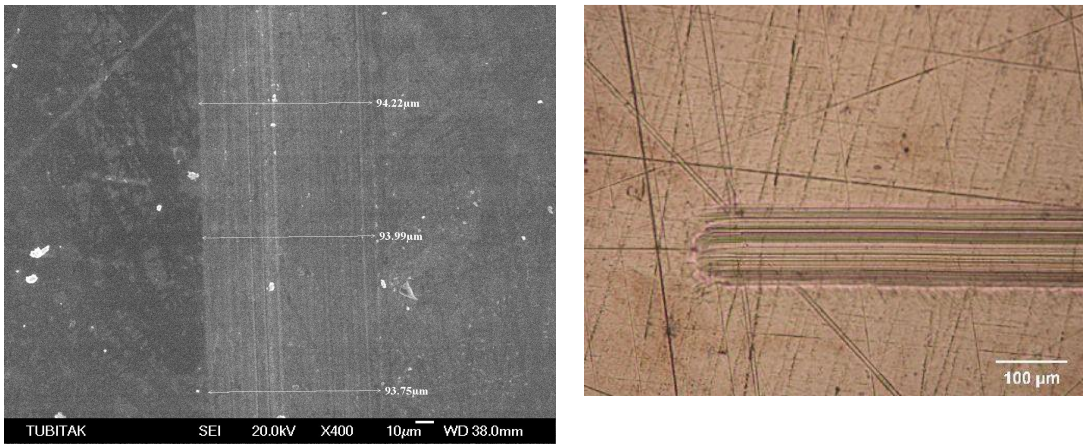


Şekil 5.38. Numune 6'in optik mikroyapı görüntüsü.



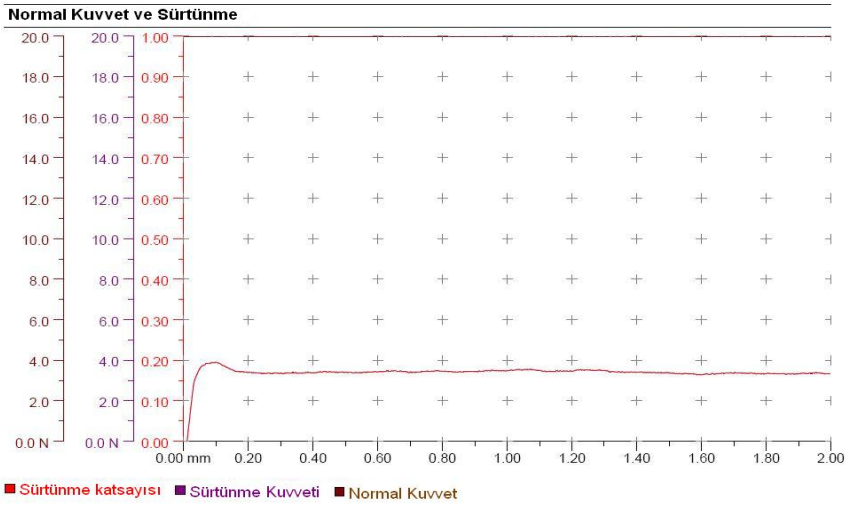
Şekil 5.39. Numune 6'nın XRD sonucu.

Numuneler üzerine scratch test (yüzey çizilme dayanımı testi) cihazı ile oluşturulan izin ortalama kalınlığı Şekil 5.40-a 'daki SEM görüntüsünden 93,98 µm olarak ölçülmüştür. Optik ve SEM görüntüleri incelendiğinde (Şekil 5.40-a,b) çok düzgün bir çizilme izi görülmektedir. İzin kenarlarında herhangi bir yığılma veya çatlak görülmemiştir. Çizilme izinin bitiş ucunda birikme meydana gelmezken iç kısmın çok düzgün olduğu fark edilebilmektedir. Parçadan malzeme kopmamış ve mükemmel bir iz oluşmuştur. Şekil 5.41'de numuneye uygulanan scratch test sonuçlarının çıktısı görülmektedir. Bu sonuçlardan sürtünme katsayısı yaklaşık 0,18 ve nüfuziyet derinliği yaklaşık 19450 nm olarak ölçülmüştür.

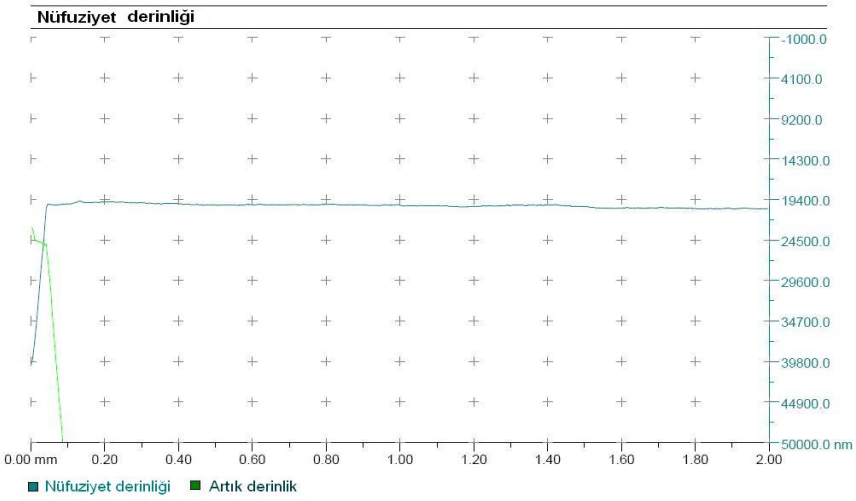


-a- -b-

Şekil 5.40. Numune 6'da oluşan çizilme izinin (a) optik ve (b) SEM görüntüsü.



-a-



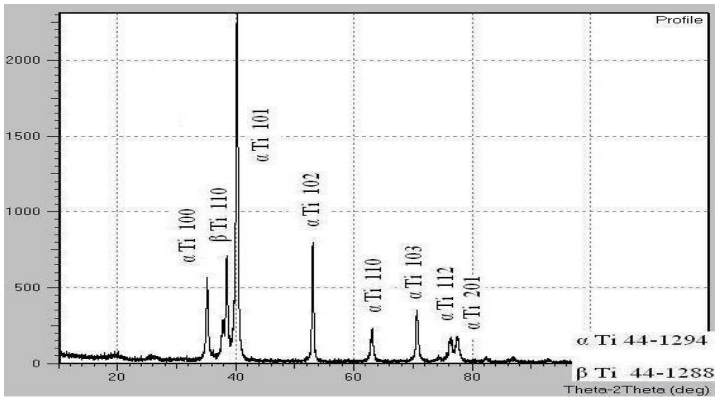
-b-

Şekil 5.41. Numune 6'nın yüzey çizilme dayanımı testi sonuçları
a) sürtünme, b)derinlik.

h -- Numune 7: Ti6Al4V alaşımına, oda sıcaklığından 1050 ^{o}C'ye kadar ısıtılıp bu sıcaklıkta 1 saat bekletildikten sonra havada soğuma işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu ısıl işlemden sonra numuneler oda sıcaklığından 550°C'ye kadar ısıtıldıktan sonra bu sıcaklıkta 8 saat bekletildikten sonra fırın ortamında soğumaya bırakılmıştır. Yaşlanma ile iğnesel α plakalardan β fazı çökelmiştir. Artan süre ile plakalar kabalaşmıştır. Isıl işlem sonrası elde edilen mikro yapıya ait ışık mikroskobu görüntüsü Şekil 5.42'de görülmektedir. Numuneye ait XRD sonucu Şekil 5.43 'de görülmektedir.



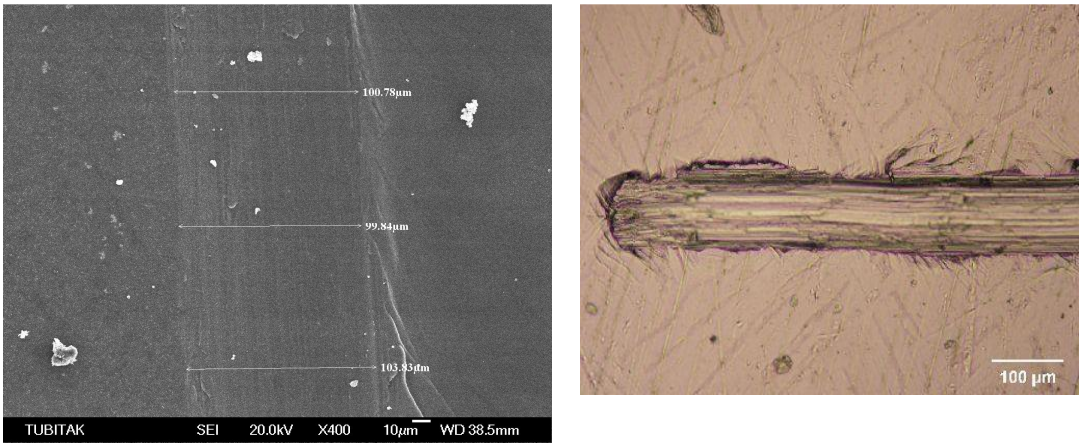
Şekil 5.42. Numune 7'in optik mikroyapı görüntüsü.



Şekil 5.43. Numune 7'nin XRD sonucu.

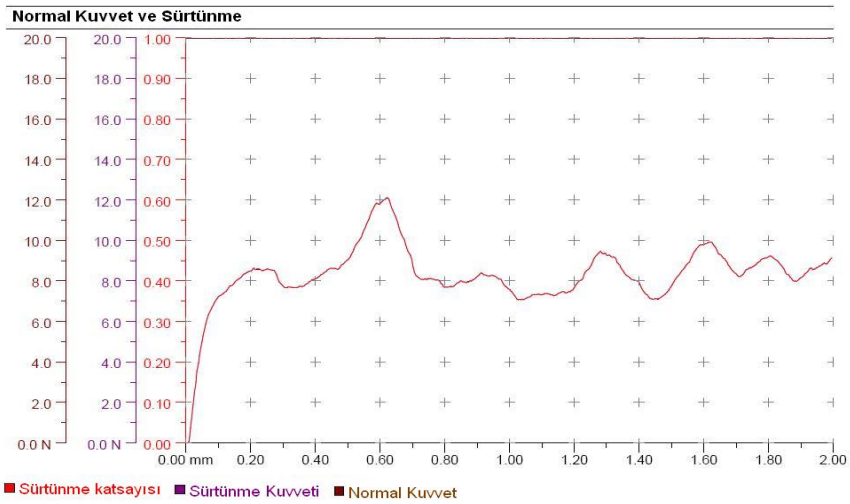
Numuneler üzerine scratch test (yüzey çizilme dayanımı testi) cihazı ile oluşturulan izin ortalama kalınlığı Şekil 5.44-a 'daki SEM görüntüsünden 101,48 µm olarak ölçülmüştür. Optik ve SEM görüntüleri incelendiğinde (Şekil 5.44-a,b) kalın ve kötü bir çizilme izi karakteristiği görülmektedir. İzin kenarlarında yığılma ve küçüklü

büyüklü çatlaklar görülmektedir. Çizilme izinin bitiş ucunda birikme meydana gelmiş, iç kısımlarda ve kenarlarda malzeme kopmaları gözlenmektedir. Şekil 5.45'de numuneye uygulanan scratch test sonuçlarının çıktısı görülmektedir. Bu sonuçlardan sürtünme katsayısı yaklaşık 0,48 ve nüfuziyet derinliği yaklaşık 15250 nm olarak ölçülmüştür.



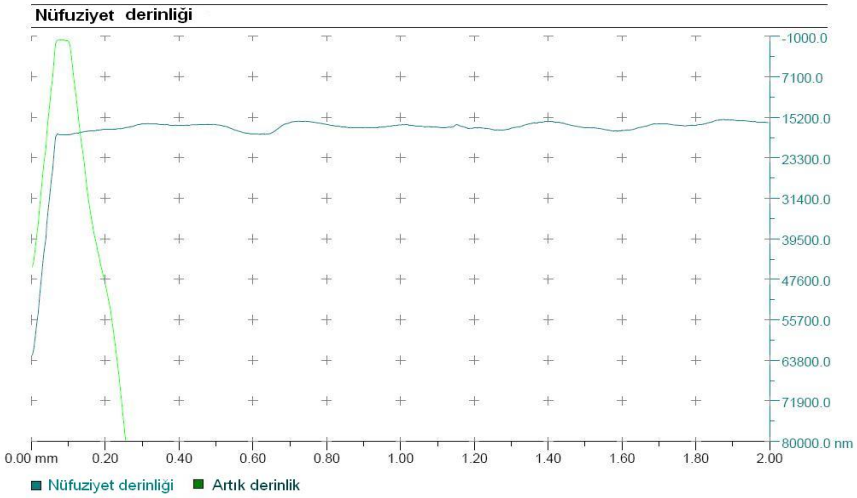
-a- -b-

Şekil 5.44. Numune 7'de oluşan çizilme izinin (a) optik ve (b) SEM görüntüsü.



-a-

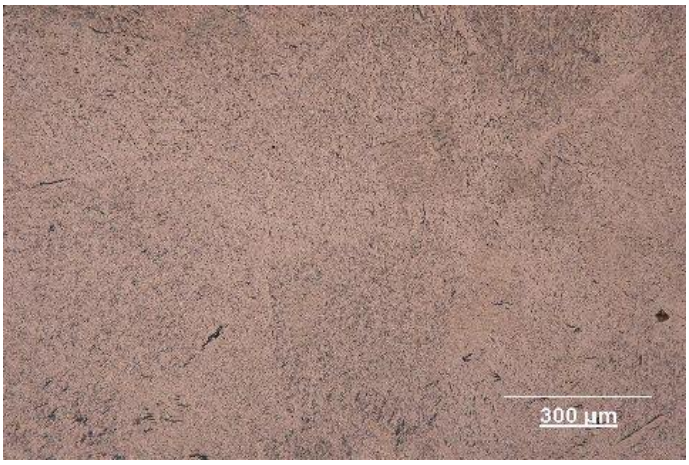
Şekil 5.45. Numune 7'nin yüzey çizilme dayanımı testi sonuçları
a) sürtünme, b)derinlik.



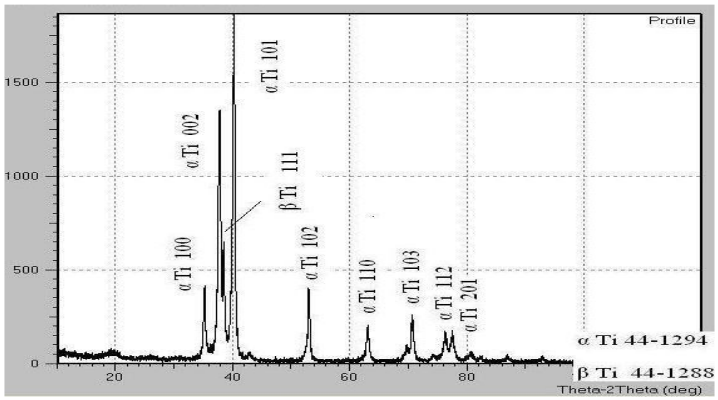
-b-

Şekil 5.45. (Devam) Numune 7'nin yüzey çizilme dayanımı testi sonuçları a) sürtünme, b)derinlik.

i -- Numune 8: Ti6Al4V alaşımına, oda sıcaklığından 950 ^{o}C'ye kadar ısıtılıp bu sıcaklıkta 1 saat bekletildikten sonra suda soğutma işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu sıcaklıkta 1010 ^{o}C olan β geçiş bölgesinin yaklaşık 50 ^{o}C altında çözündürme uygulanmıştır. Bu sıcaklıkta birincil α ile β fazı birlikte bulunacaktır. Bu sıcaklıktan su verme işlemi yapıldığı zaman β fazından α` martenzit oluşacaktır. Böylece yapı β, α ve α` fazlarından oluşacaktır. Isıl işlem sonrası elde edilen mikro yapıya ait ışık mikroskobu görüntüsü Şekil 5.46'de görülmektedir. Numuneye ait XRD sonucu Şekil 5.47 'de görülmektedir.

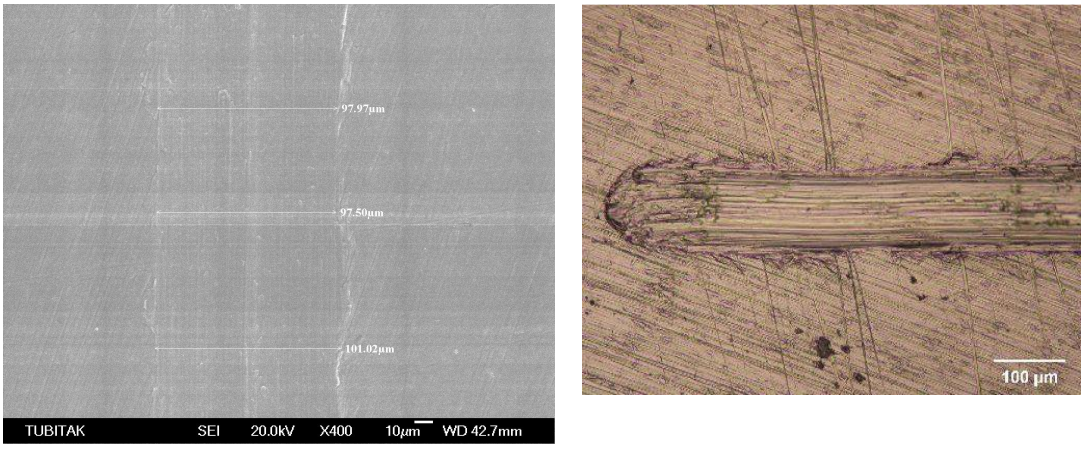


Şekil 5.46. Numune 8'in optik mikroyapı görüntüsü.



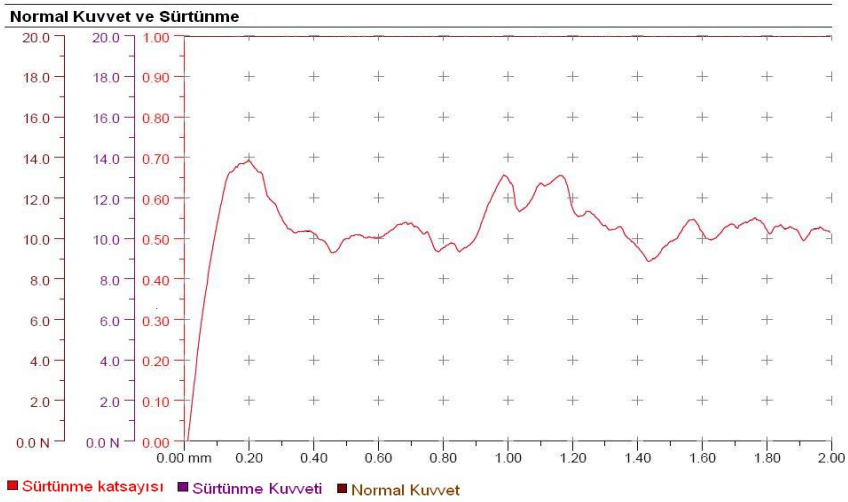
Şekil 5.47. Numune 8'in XRD sonucu.

Numuneler üzerine scratch test (yüzey çizilme dayanımı testi) cihazı ile oluşturulan izin ortalama kalınlığı Şekil 5.48-a 'daki SEM görüntüsünden 98,83 µm olarak ölçülmüştür. Optik ve SEM görüntüleri incelendiğinde (Şekil 5.48-a,b) düzgün bir çizilme izi görülmektedir. İzin kenarlarında çok miktarda yığılma ve küçük çatlaklar görülmektedir. Çizilme izinin bitiş ucunda birikme meydana gelmezken iç kısımlarda ve kenarlarda malzeme kopması net olarak görülmektedir. Şekil 5.49'da numuneye uygulanan scratch test sonuçlarının çıktısı görülmektedir. Bu sonuçlardan sürtünme katsayısı yaklaşık 0,58 ve nüfuziyet derinliği yaklaşık 29500 nm olarak ölçülmüştür.

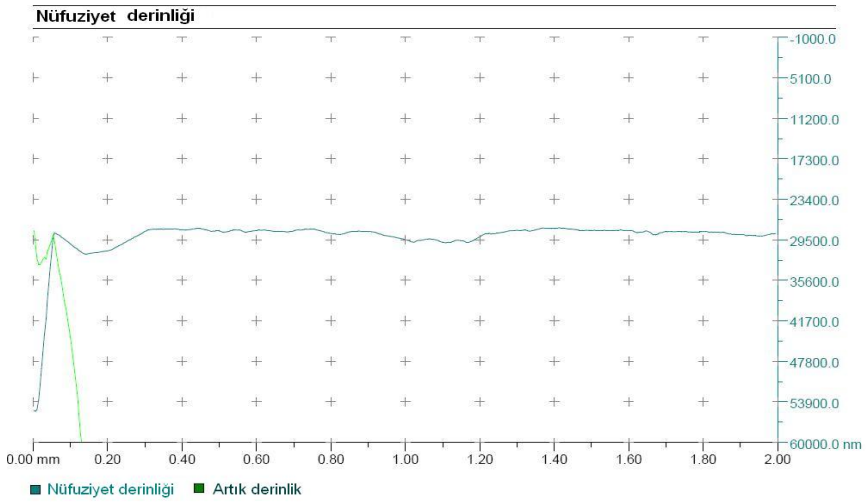


-a- -b-

Şekil 5.48. Numune 8'de oluşan çizilme izinin (a) optik ve (b) SEM görüntüsü.



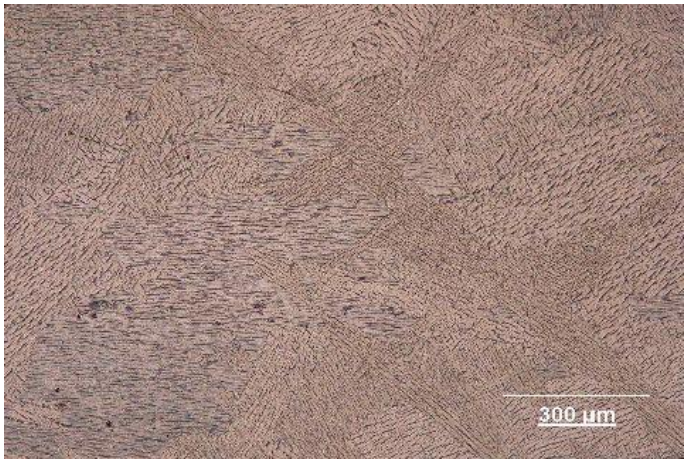
-a-



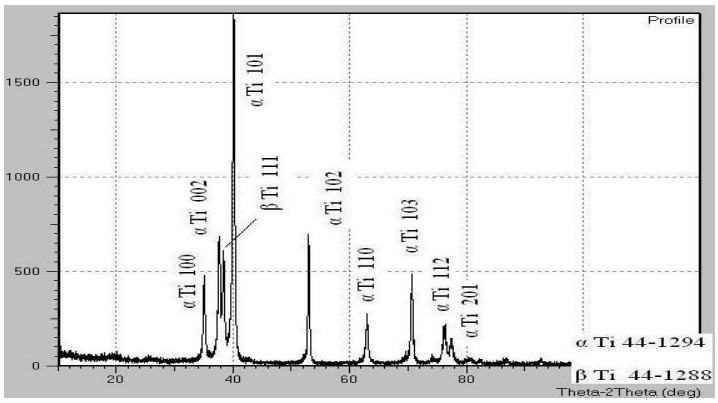
-b-

Şekil 5.49. Numune 8'in yüzey çizilme dayanımı testi sonuçları
a) sürtünme, b)derinlik.

j -- Numune 9: Ti6Al4V alaşımına, oda sıcaklığından 950 ^{o}C'ye kadar ısıtılıp bu sıcaklıkta 1 saat bekletildikten sonra havada soğutma işlemi gerçekleştirilmiştir. Yapı dönüşmüş β matrisinde bir kısmı iğnesel α olan birincil α'lardan oluşmuştur. Isıl işlem sonrası elde edilen mikro yapıya ait ışık mikroskobu görüntüsü Şekil 5.50'de görülmektedir. Numuneye ait XRD sonucu Şekil 5.51 'de görülmektedir.

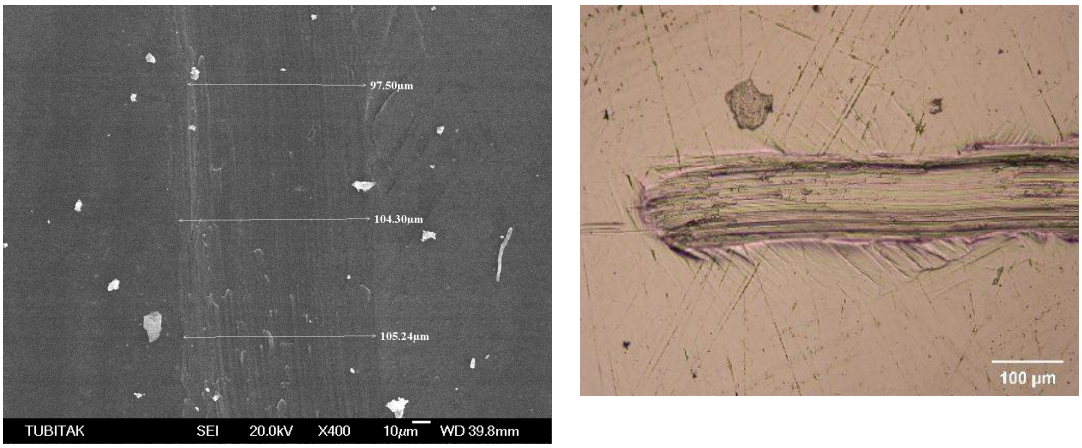


Şekil 5.50. Numune 9'un optik mikroyapı görüntüsü.



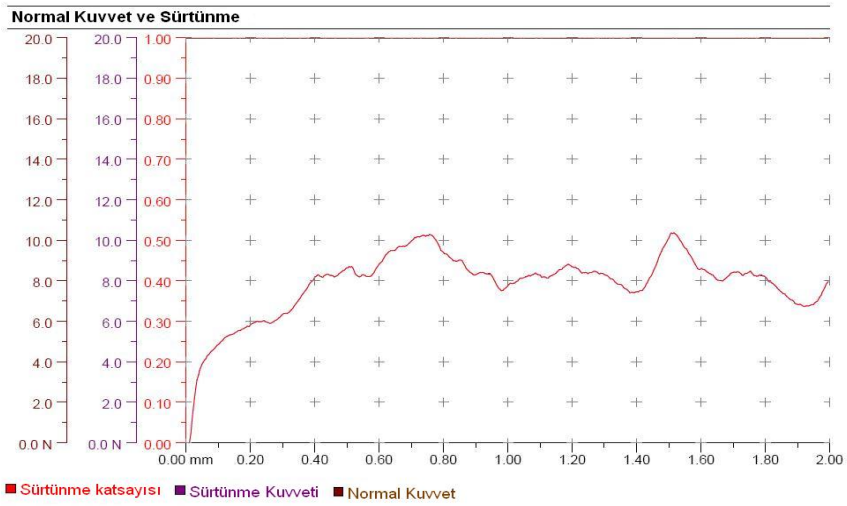
Şekil 5.51. Numune 9'un XRD sonucu.

Numuneler üzerine scratch test (yüzey çizilme dayanımı testi) cihazı ile oluşurulan izin ortalama kalınlığı Şekil 5.52-a 'daki SEM görüntüsünden 102,34 µm olarak ölçülmüştür. Optik ve SEM görüntüleri incelendiğinde (Şekil 5.52-a,b) kötü bir çizilme izi karakteristiği görülmektedir. İzin kenarlarında yığılma görülmezken çok büyük çatlaklar fark edilmektedir. Çizilme izinin bitiş ucunda çok fazla birikme meydana gelmiştir. İç kısımlarda az miktarda malzeme kopması gözlenmiştir. Şekil 5.53'de numuneye uygulanan scratch test sonuçlarının çıktısı görülmektedir. Bu sonuçlardan sürtünme katsayısı yaklaşık 0,43 ve nüfuziyet derinliği yaklaşık 21900 nm olarak ölçülmüştür.

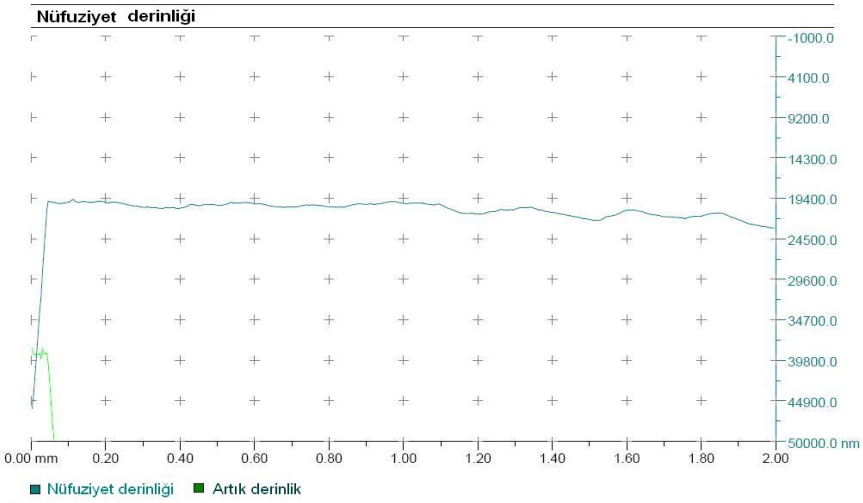


-a- -b-

Şekil 5.52. Numune 9'da oluşan çizilme izinin (a) optik ve (b) SEM görüntüsü.



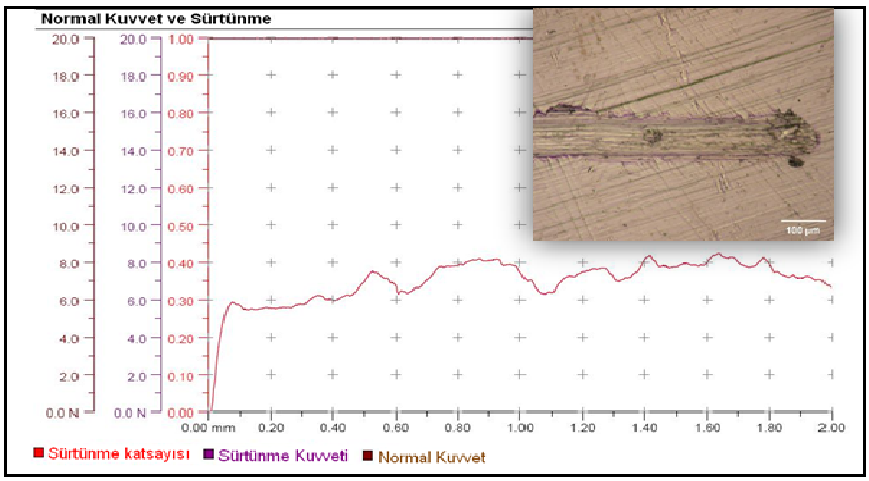
-a-



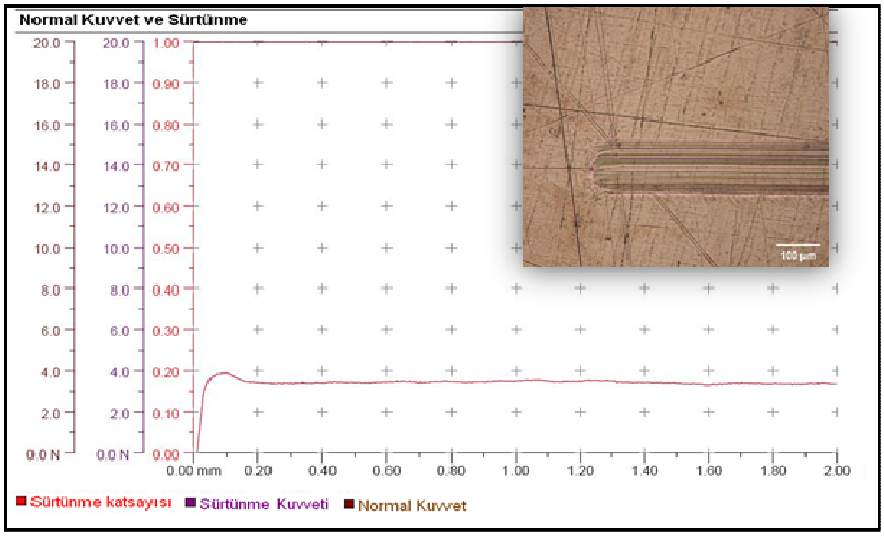
-b-

Şekil 5.53. Numune 9'un yüzey çizilme dayanımı testi sonuçları
a) sürtünme, b)derinlik.

Scratch test verilerinden elde edilen "kuvvet-sürtünme kuvveti" grafikleri incelendiğinde, iç yüzeylerinde malzeme kopması olan çizilme izlerinde tepe ve vadilerin çok olduğu gözlenmiştir. Artan sertlikle birlikte yüzey çizilme izlerinde talaş kaldırma olayı sürekli değil kesintili olarak meydana gelmiştir. Buradan çizici uçun; numunenin sertliğine (gevrekliğine) bağlı olarak oluşan izden malzeme kopardığı ve kopma sırasında da piklerin oluştuğunu söyleyebiliriz. Numune 2'de (1050 ^{o}C 1 saat bekleme+havada soğutma) oluşan dalgalı grafik ile Numune 6'da (1050°C 1 saat bekleme+suda soğutma+550°C 8 saat bekleme+fırında soğutma) oluşan düzgün grafik incelendiğinde aradaki fark daha iyi anlaşılacaktır (Şekil 5.54).



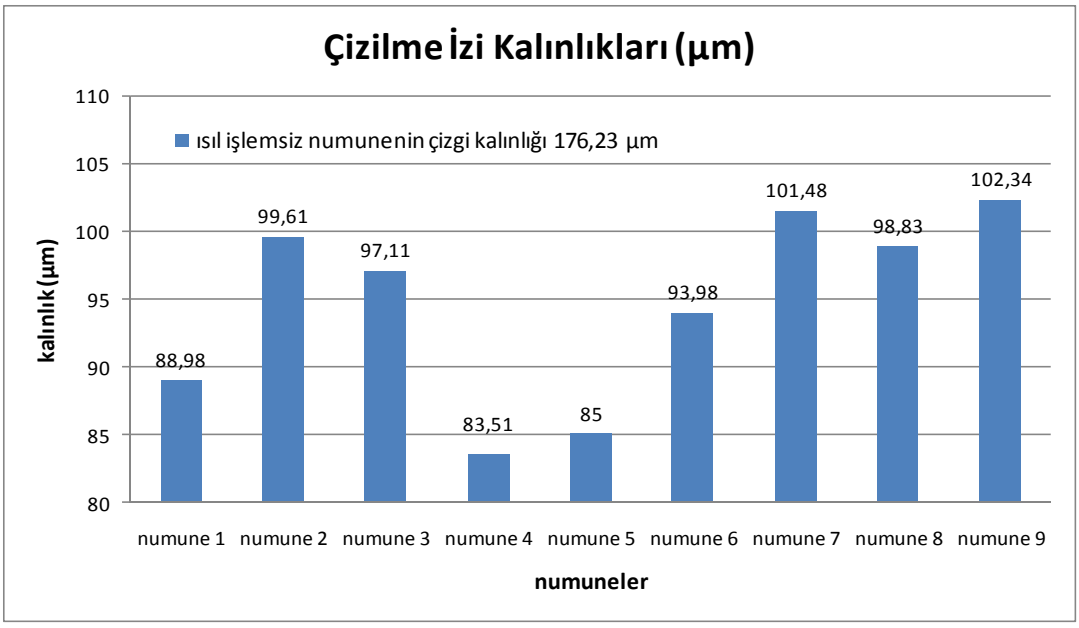
-a-



-b-

Şekil 5.54. Numunelerin sürtünme katsayısı grafiği ve çizilme izlerinin karşılaştırılması. a) Numune 2, b) Numune 6

Elde edilen grafiklerden okunan en yüksek sürtünme kuvveti değerleri ısıl işlem görmemiş numunede gözlenmiştir. Derinlik grafikleri (penetrasyon) incelendiğinde çizici ucun Numune 4'e diğerlerine nazaran daha az battığı ve ısıl işlemsiz numunede ise ısıl işlem görmüş numunelerin yaklaşık iki katı değerde olduğu görülmüştür. Böylece yüzey çizilme dayanımı testi sonuçlarından ısıl işlem sayesinde numunenin sertleştirildiği ve en fazla sertliğin ise Numune 4'den ölçüldüğü söylenebilir. Ayrıca numune sertlikleri ile yüzey çizilme izi kalınlığı arasında mantıklı bir ilişki bulunmaktadır. Yani sertliği yüksek olan numunede çizilme izi kalınlığı dar, sertliği düşük olan numunede çizilme izi kalınlığı daha geniştir (Şekil 5.55).



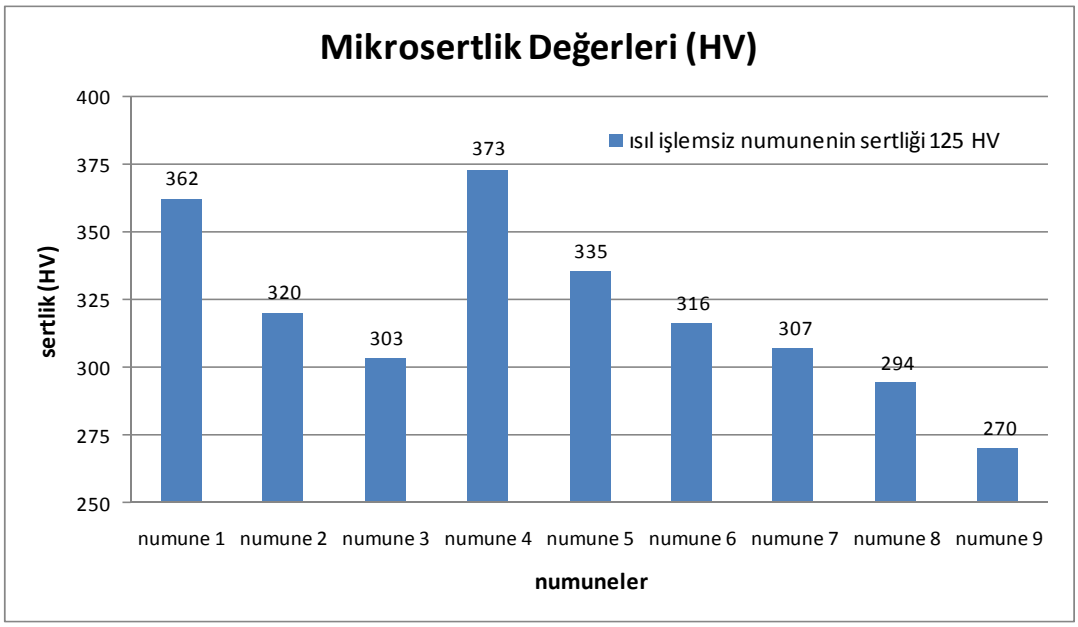
Şekil 5.55. Scratch test sonucu oluşan çizilme izi kalınlıkları.

5.2.2. Isıl işlemler sonrası mikro sertlik ölçümleri

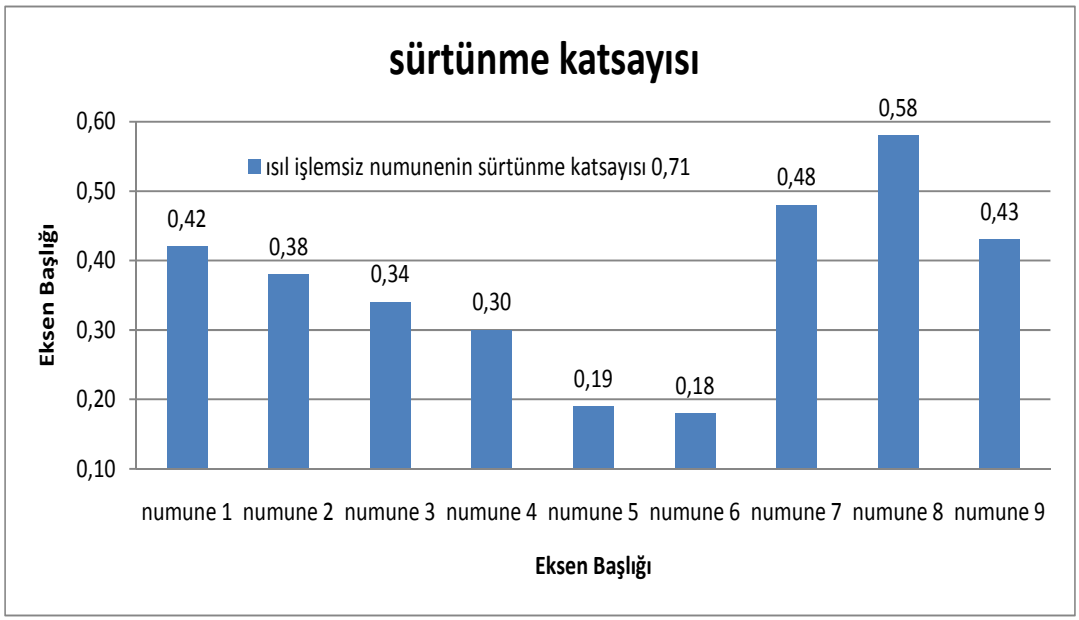
Numunelere yapılan Vickers mikrosertlik değerleri Tablo 5.5 ve Şekil 5.56'da görülmektedir. Tablo 5.5'den en sert malzemenin Numune 4 olduğu, en yumuşak malzemenin ise ısıl işlem görmemiş numune olduğu açıkça görülmektedir. Görüldüğü gibi mikrosertlik ölçümleri de yüzey çizilme dayanımı testi sonuçlarını doğrulamaktadır; ısıl işlem sayesinde numunenin sertliği önemli derecede artmaktadır. Ayrıca ölçülen sürtünme katsayısı değerleri de mikrosertlik değerlerine göre beklenen sonuçları vermiştir (Şekil 5.57).

Tablo 5.5. Numunelerin Vickers mikrosertlik değerleri tablosu.

HV 300g	1	2	3	4	5	6	**Ortalama**
Isıl işlemsiz numune	128	121	126	128	122	128	**125**
Numune 1	367	362	355	363	362	367	**362**
Numune 2	324	317	324	301	324	332	**320**
Numune 3	306	295	295	301	320	302	**303**
Numune 4	370	367	372	375	375	379	**373**
Numune 5	354	282	298	352	361	363	**335**
Numune 6	314	311	317	318	315	318	**316**
Numune 7	315	302	289	317	311	304	**307**
Numune 8	297	295	295	294	290	292	**294**
Numune 9	279	280	277	280	275	277	**278**



Şekil 5.56. Numunelerin Vickers mikrosertlik değerleri grafiği.



Şekil 5.57. Scratch test sonucu ölçülen sürtünme katsayısı değerleri.

5.2.3. Isıl işlemler sonrası kumlama ve yüzey pürüzlülük testi sonuçları

Çalışmanın bu kısmında, ısıl işleme tabi tutulmuş tüm numuneler 15, 45 ve 90 dereceli açılarda 2, 3 ve 4 bar basınç ile 30 sn süre boyunca kumlama işlemine tabi tutulmuştur. Kumlama öncesi ve sonrası ağırlıklar hassas terazi ile ölçülmüştür.

Ayrıca her açı değeri için 4 bar basınç ile kumlanan numuneler SEM cihazı ile görüntülenip pürüzlülük ve EDS analizi sonuçları incelenmiştir.

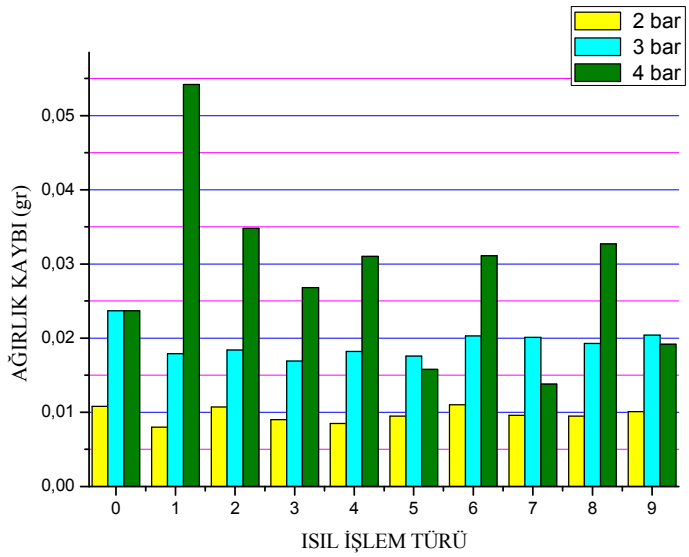
5.2.3.1. 15 dereceli kumlama

Tablo 5.6. 15 derece açı ile 2, 3 ve 4 bar basınç altında 30 sn kumlamanın ağırlık ölçümleri.

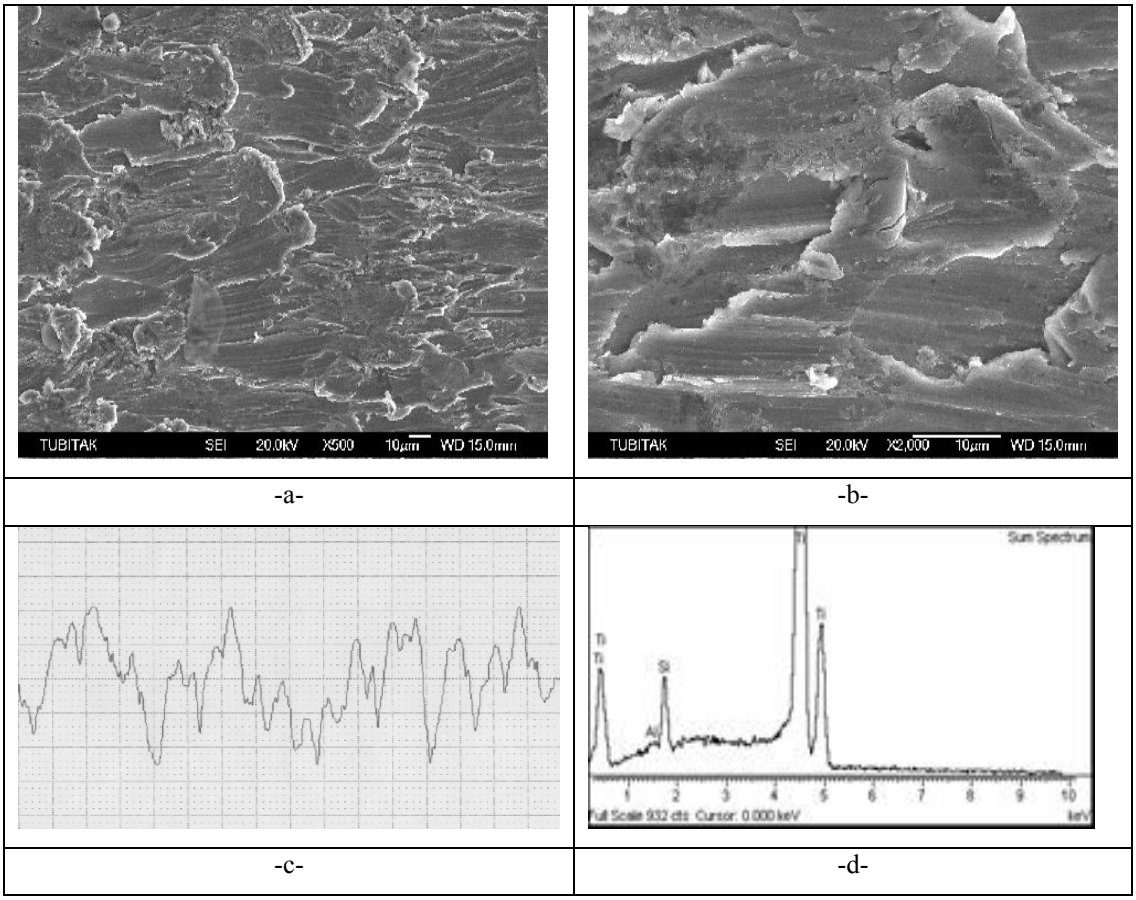
15° 2 bar 30 sn			
işlem no	işlem öncesi ağırlık (gr)	işlem sonrası ağırlık (gr)	fark (gr)
1	5,4503	5,4423	0,0080
2	5,7259	5,7152	0,0107
3	7,2247	7,2157	0,0090
4	5,9148	5,9063	0,0085
5	5,6031	5,5936	0,0095
6	5,8740	5,8630	0,0110
7	5,8922	5,8826	0,0096
8	5,3693	5,3598	0,0095
9	5,9238	5,9137	0,0101
işlemsiz	6,1282	6,1174	0,0108

15° 3 bar 30 sn			
işlem no	işlem öncesi ağırlık (gr)	işlem sonrası ağırlık (gr)	fark (gr)
1	5,9393	5,9214	0,0179
2	7,1221	7,1037	0,0184
3	5,8889	5,8720	0,0169
4	6,1125	6,0943	0,0182
5	5,7920	5,7744	0,0176
6	6,8536	6,8333	0,0203
7	5,5426	5,5225	0,0201
8	5,7276	5,7083	0,0193
9	5,5434	5,5230	0,0204
işlemsiz	6,5613	6,5376	0,0237

15° 4 bar 30 sn			
işlem no	işlem öncesi ağırlık (gr)	işlem sonrası ağırlık (gr)	fark (gr)
1	5,9613	5,9071	0,0542
2	5,4260	5,3912	0,0348
3	5,8262	5,7994	0,0268
4	5,4759	5,4449	0,0310
5	6,0832	6,0674	0,0158
6	5,5088	5,4777	0,0311
7	6,0010	5,9872	0,0138
8	5,7099	5,6772	0,0327
9	5,9625	5,9433	0,0192
işlemsiz	6,6258	6,6021	0,0237



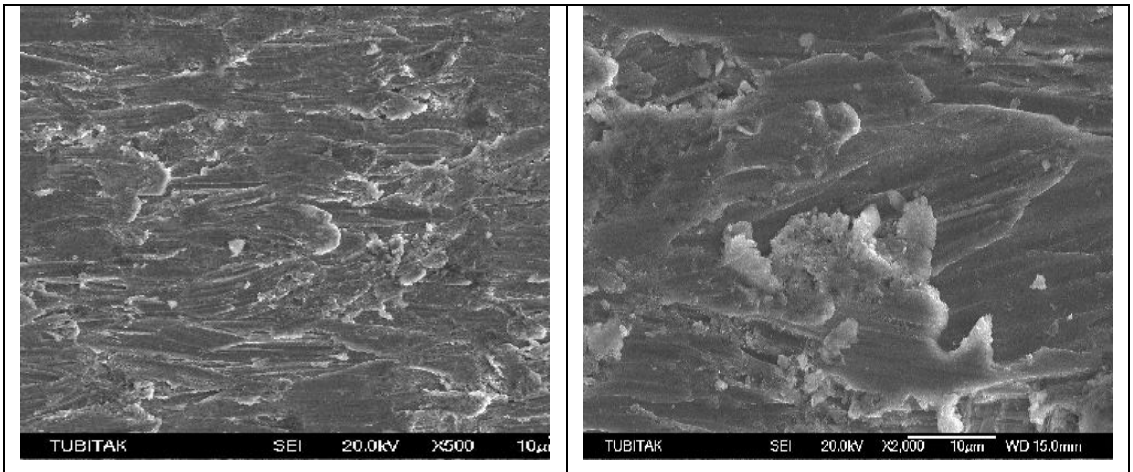
Şekil 5.58. 15 derece kumlamada ısıl işlem türüne göre her basınç değeri için ağırlık kaybı farkları.



-a- -b-

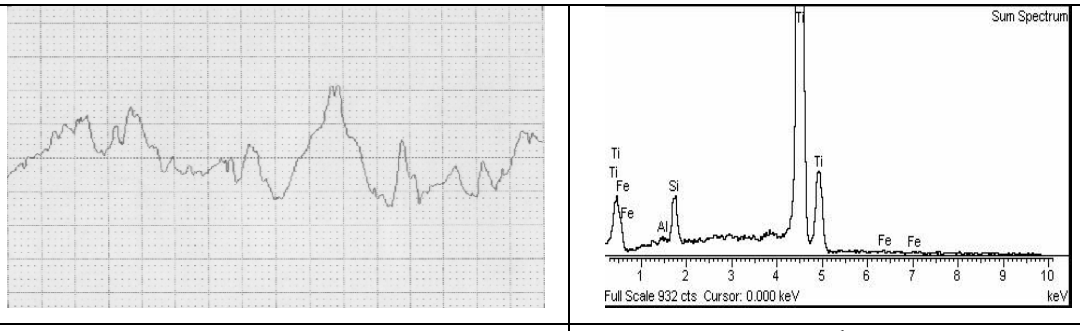
-c- -d-

Şekil 5.59. Isıl işlem yapılmamış numunenin 15 derece açı ile 4 bar kumlama bulguları. 500 büyütme (a) ve 2000 büyütmede (b) SEM görüntüleri, yüzey pürüzlülük grafiği (c), EDS analizi (d).



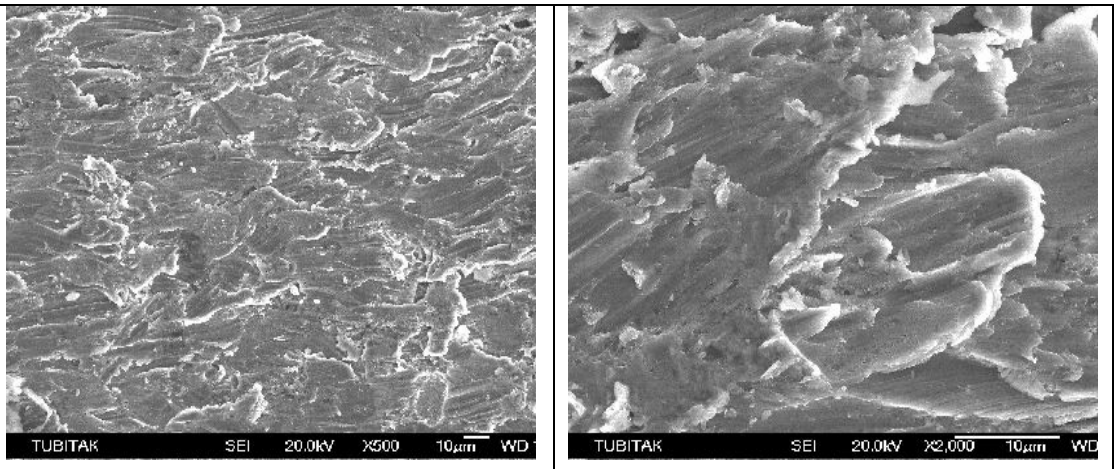
-a- -b-

Şekil 5.60. Numune 1 ’in 15 derece açı ile 4 bar kumlama bulguları. 500 büyütme (a) ve 2000 büyütmede (b) SEM görüntüleri, yüzey pürüzlülük grafiği (c), EDS analizi (d).

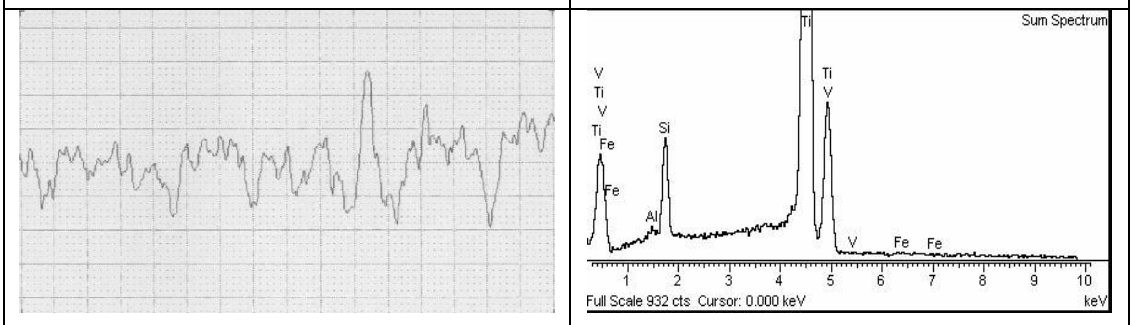


-c- -d-

Şekil 5.60. (Devamı) Numune 1 ’in 15 derece açı ile 4 bar kumlama bulguları. 500 büyütme (a) ve 2000 büyütmede (b) SEM görüntüleri, yüzey pürüzlülük grafiği (c), EDS analizi (d).

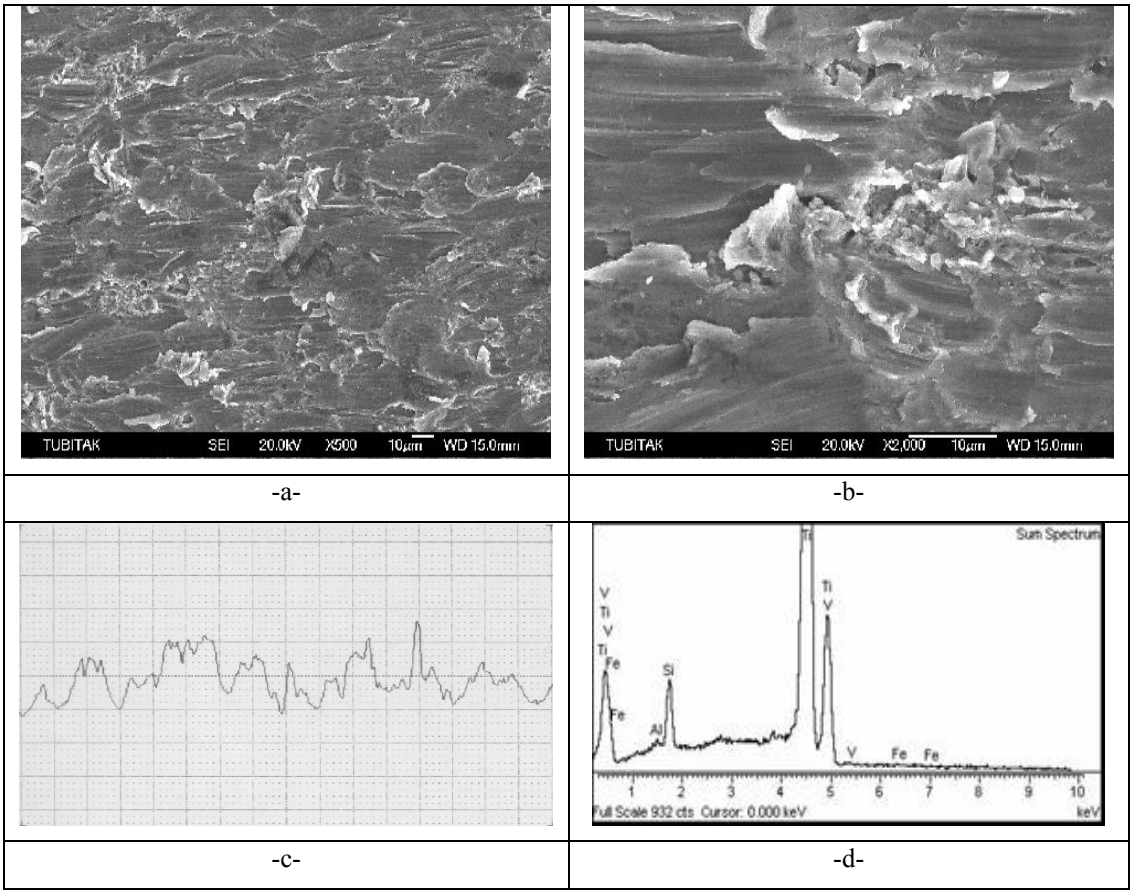


-a- -b-



-c- -d-

Şekil 5.61. Numune 2 ’nin 15 derece açı ile 4 bar kumlama bulguları. 500 büyütme (a) ve 2000 büyütmede (b) SEM görüntüleri, yüzey pürüzlülük grafiği (c), EDS analizi (d).



Şekil 5.62. Numune 3 ’ün 15 derece açı ile 4 bar kumlama bulguları. 500 büyütme (a) ve 2000 büyütmede (b) SEM görüntüleri, yüzey pürüzlülük grafiği (c), EDS analizi (d).

Şekil 5.58 incelendiğinde ağırlık kaybı bakımından en yüksek değer, sertliği en fazla olan suda soğutulmuş numunede gözlenmiştir. Havada ve fırında soğutulan numunelere kıyasla suda soğutulan numunenin ağırlık kaybı çok fazladır. Fırında soğutulan numune ile ısıl işlem görmemiş numunenin ağırlık kayıpları birbirlerine yakındır. Yataya yakın bir açı ile püskürtme yapıldığından kum taneciklerinin numune yüzeyleri ile daha az temas ederek uzaklaştığı ve düşük açılı kumlamanın numunelerden çok daha az parça koparılmasına neden olduğu Bölüm 5.1’de açıklanmıştır. Kum partiküllerinin numunelerin yüzeyini, kumlamanın yapıldığı doğrultuda çizdiği SEM görüntüleri incelendiğinde (Şekil 5.59-5.62/a,b) çok net görülmektedir. Ayrıca sertlik azaldıkça kumların yüzeyde bıraktığı izlerde azalmakta olduğu gözlenmiştir. Açının düşük olması partiküllerin yüzeye saplanmasına olanak sağlamamıştır. Yapılan EDS analizlerinin sonuçlarından (Şekil 5.59-5.62/d) 15 derecelik kumlama açısına bağlı olarak kum tanelerinin, fırında soğutulan numunenin ve ısıl işlem görmemiş numunenin yüzeylerinden fazla parça koparak

uzaklaştığı ve numunelerin yüzeylerine saplanmadığı; suda soğutulan numunede ise sertliğe bağlı olarak yüzeyden parça kopmasının ve taneciklerin yüzeye saplanmasının diğerlerine nazaran daha az yaşandığı yorumunu yapabiliriz. Ayrıca fırında soğutulan numunenin ve ısıl işlem görmemiş numunenin Si oranları yani saplanan kum miktarlarının ve ağırlık kayıplarının değerlerinin çok yakın olduğu gözlenmiştir. Tablo 5.7'de 15 derece açı ile kumlanmış numunelerin %Si miktarı ile Ra ve Ry pürüzlülük değerleri görülmektedir. Isıl işlem görmemiş numunelerin pürüzlülük değerlerinin birbirlerine yakın olduğu ve ısıl işlemsiz numuneye kıyasla kumlanmadan daha az etkilendikleri görülmektedir.

Tablo 5.7. 15 derece açı ve 4 bar ile yapılan kumlamanın ısıl işlem numuneleri yüzeyleri ölçülen % Si miktarı ile Ra ve Ry pürüzlülük değerleri.

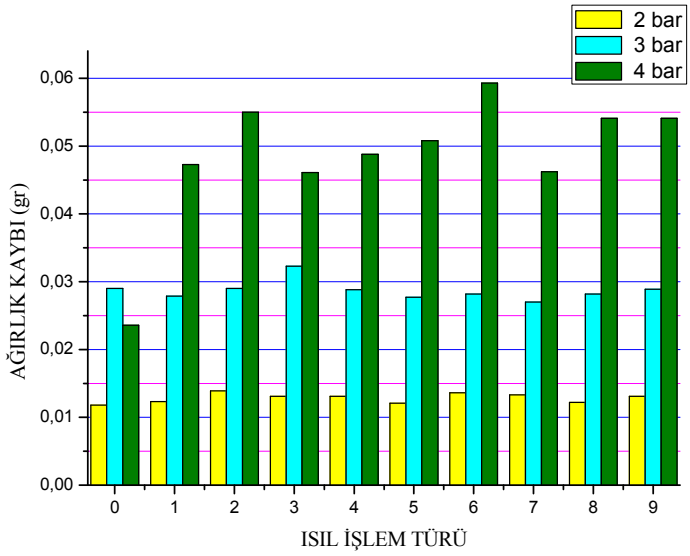
	% Si	**Ra (µm)**	**Ry (µm)**
1-Suda soğutulan numune	3,69	1,34	8,21
2-Havada soğutulan numune	4,11	1,39	10,14
3-Fırında soğutulan numune	3,03	1,38	8,55
0-Isıl işlemsiz	3,05	2,17	13,24

5.2.3.2. 45 dereceli kumlama

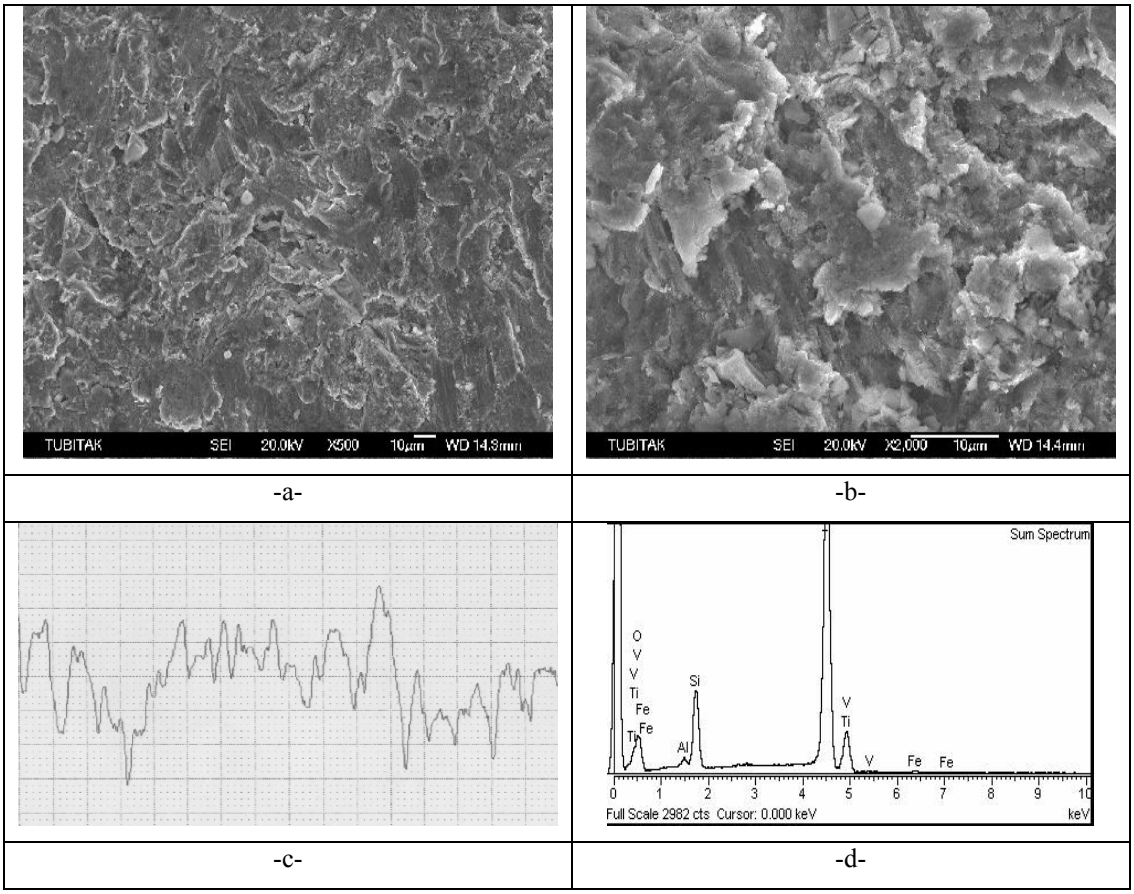
Tablo 5.8. 45 derece açı ile 2, 3 ve 4 bar basınç altında 30 sn kumlamanın ağırlık ölçümleri.

45° 2 bar 30 sn				45° 3 bar 30 sn			
işlem no	işlem öncesi ağırlık (gr)	işlem sonrası ağırlık (gr)	fark (gr)	işlem no	işlem öncesi ağırlık (gr)	işlem sonrası ağırlık (gr)	fark (gr)
1	5,7585	5,7462	0,0123	1	6,2913	6,2634	0,0279
2	5,8803	5,8664	0,0139	2	5,4847	5,4557	0,0290
3	5,2428	5,2297	0,0131	3	6,0208	5,9885	0,0323
4	5,2471	5,2340	0,0131	4	5,4667	5,4379	0,0288
5	5,8784	5,8663	0,0121	5	5,4410	5,4133	0,0277
6	4,9863	4,9727	0,0136	6	5,7474	5,7192	0,0282
7	5,6185	5,6052	0,0133	7	5,8154	5,7884	0,0270
8	5,9079	5,8957	0,0122	8	5,8230	5,7948	0,0282
9	5,8955	5,8824	0,0131	9	5,7238	5,6949	0,0289
işlemsiz	6,8113	6,7995	0,0118	işlemsiz	6,7667	6,7377	0,0290

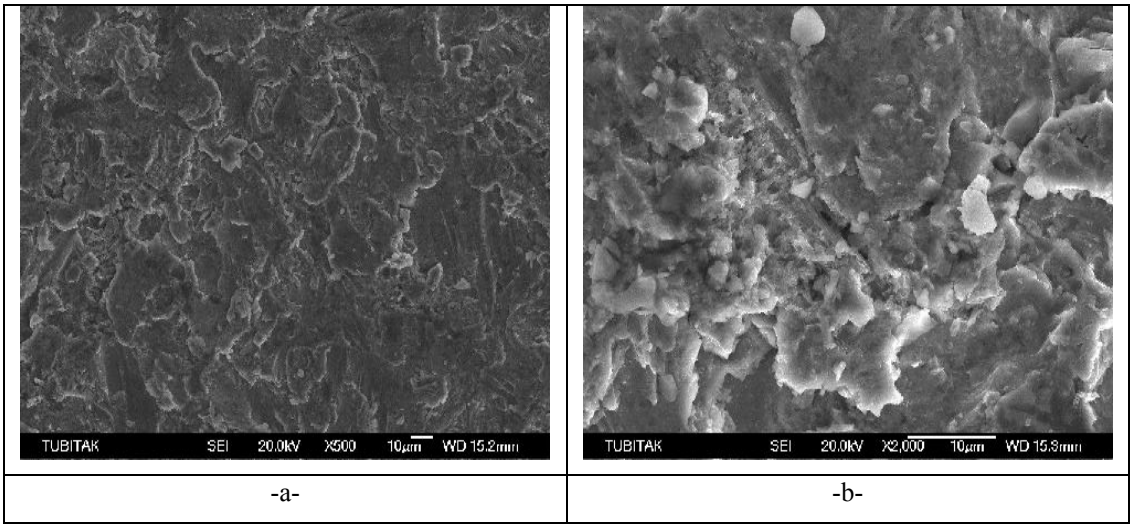
45° 4 bar 30 sn			
işlem no	işlem öncesi ağırlık (gr)	işlem sonrası ağırlık (gr)	fark (gr)
1	5,7622	5,7149	0,0473
2	5,1772	5,1222	0,0550
3	5,3190	5,2729	0,0461
4	5,8818	5,8330	0,0488
5	5,1526	5,1018	0,0508
6	5,6288	5,5695	0,0593
7	5,3448	5,2986	0,0462
8	6,2330	6,1789	0,0541
9	5,8179	5,7638	0,0541
işlemsiz	6,7968	6,7732	0,0236



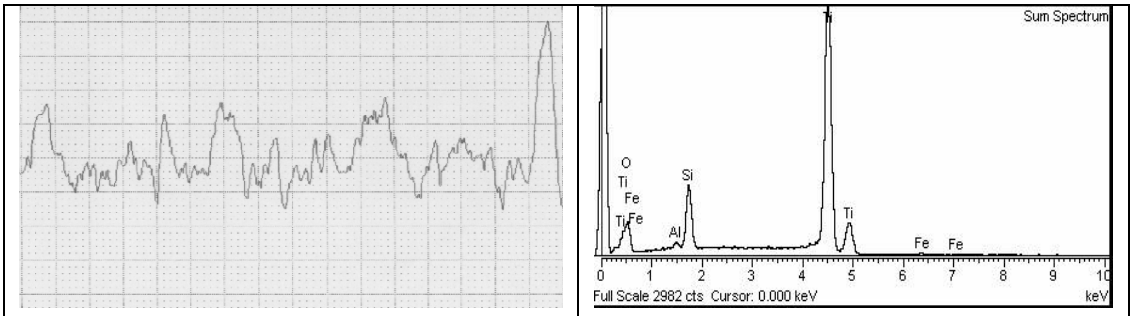
Şekil 5.63. 45 derece kumlamada ısıl işlem türüne göre her basınç değeri için ağırlık kaybı farkları.



Şekil 5.64. Isıl işlem yapılmamış numunenin 45 derece açı ile 4 bar kumlama bulguları. 500 büyütme (a) ve 2000 büyütmede (b) SEM görüntüleri, yüzey pürüzlülük grafiği (c), EDS analizi (d).

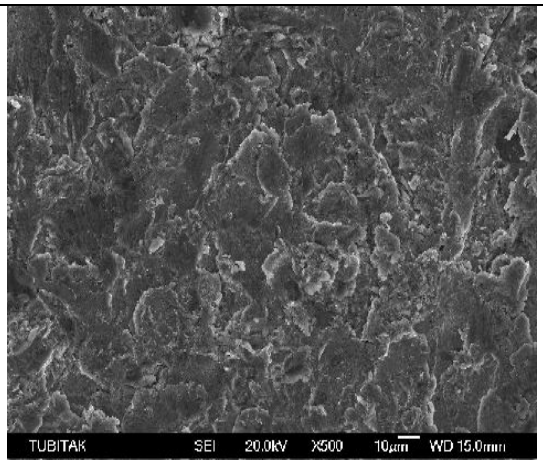


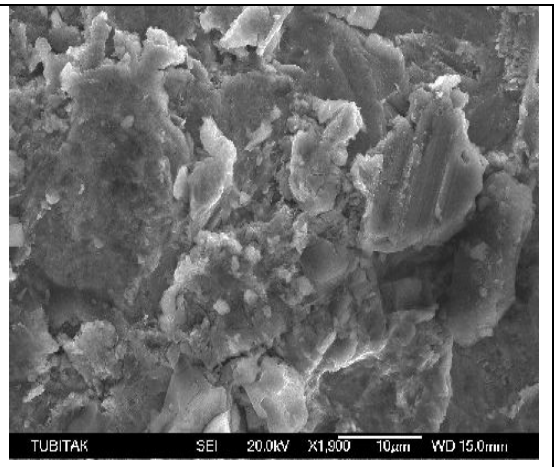
Şekil 5.65. Numune 1 ’in 45 derece açı ile 4 bar kumlama bulguları. 500 büyütme (a) ve 2000 büyütmede (b) SEM görüntüleri, yüzey pürüzlülük grafiği (c), EDS analizi (d).



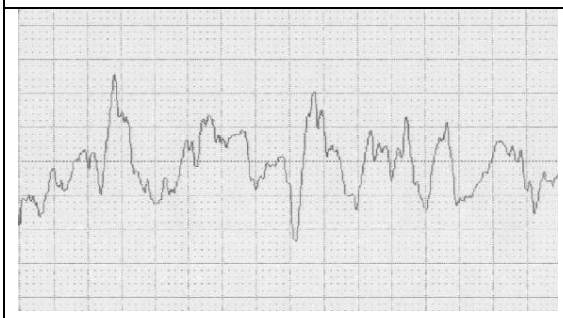
-c- -d-

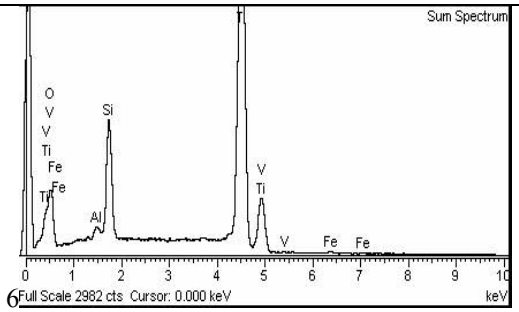
Şekil 5.65. (Devamı) Numune 1 ’in 45 derece açı ile 4 bar kumlama bulguları. 500 büyütme (a) ve 2000 büyütmede (b) SEM görüntüleri, yüzey pürüzlülük grafiği (c), EDS analizi (d).





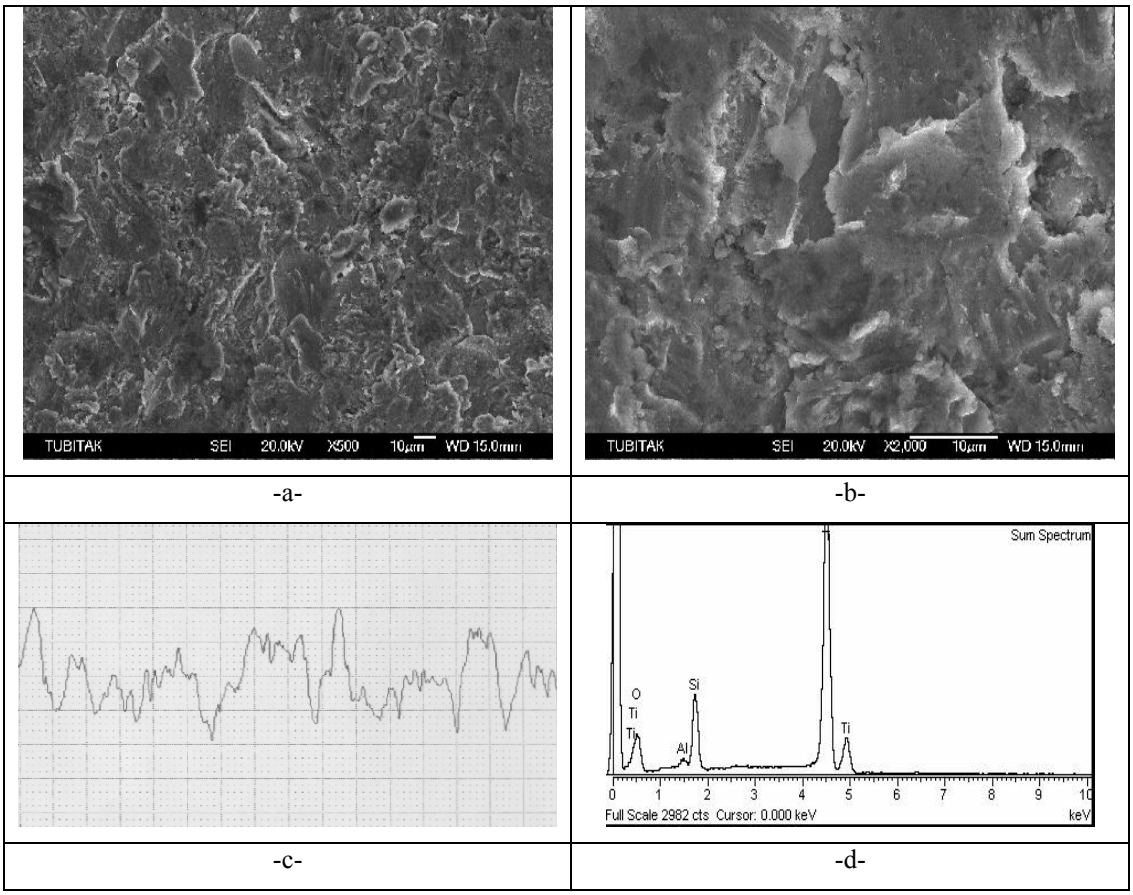
-a- -b-





-c- -d-

Şekil 5.66. Numune 2 ’nin 45 derece açı ile 4 bar kumlama bulguları. 500 büyütme (a) ve 2000 büyütmede (b) SEM görüntüleri, yüzey pürüzlülük grafiği (c), EDS analizi (d).



Şekil 5.67. Numune 3 ’ün 15 derece açı ile 4 bar kumlama bulguları. 500 büyütme (a) ve 2000 büyütmede (b) SEM görüntüleri, yüzey pürüzlülük grafiği (c), EDS analizi (d).

Tablo 5.8 incelendiğinde en yüksek ağırlık kayıplarının 45 derecede kumlanmış numunelerde meydana geldiği görülmüştür. Tüm açılarda ki kumlamaların en yüksek ağırlık kaybı havada soğutulan numuneye 45 dereceli kumlama yaparak sağlanmıştır. Suda ve fırında soğutulan numuneler de ısıl işlem görmemiş numuneye nazaran çok fazla ağırlık kaybı olmuştur. Bu kumlamada açı değerinin hem numuneden malzeme koparacak kadar, hem de kum taneciklerinin yüzeye saplanacağı kadar yeterli eğime sahip olduğu Bölüm 5.1’de açıklanmıştır. Kum taneciklerinin yüzeyi çizerek numuneleri aşındırdığı ve bazı bölgelerde taneciklerin yüzeye saplandığı hatta yüzeyde çukurcuklar oluşturduğu SEM görüntülerinden (Şekil 5.64-5.67/a-b) gözlenebilmektedir. Ağırlık kayıplarının havada soğutulan numune, suda soğutulan numune, fırında soğutulan numune ve ısıl işlemsiz numune olarak sıralanması, SEM görüntülerinden yüzey deformasyonlarının incelenmesi ile de fark edilebilir. Yapılan EDS analizlerinde (Şekil 5.64-5.67/d) 15 dereceli kumlamaya nazaran çok fazla Si oranı ile karşılaşılmış fakat havada, suda, fırında soğutulan numune ve ısıl işlemsiz

numuneler arasındaki Si oranları arasındaki farkların çok düşük olduğu görülmüştür. Buna ek olarak pürüzlülük grafikleri ve değerleri de incelendiğinde, 45 derecelik kumlama acısı ile ısıl işlem türü gözetmeksizin yaklaşık aynı değerlerin edildiği ve ısıl işlemsiz numuneye kıyasla kumlamadan daha az etkilendiği söylenebilir. Tablo 5.9'da 45 derece açı ile kumlanmış numunelerin %Si miktarı ile Ra ve Ry pürüzlülük değerleri görülmektedir.

Tablo 5.9. 45 derece açı ve 4 bar ile yapılan kumlamanın ısıl işlem numuneleri yüzeyleri ölçülen % Si miktarı ile Ra ve Ry pürüzlülük değerleri.

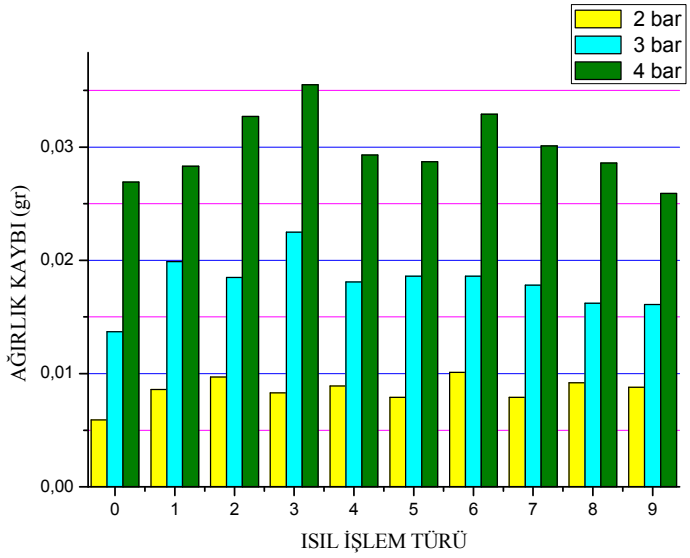
	Si %	**Ra µm**	**Ry µm**
1-Suda soğutulan numune	7,29	1,64	12,10
2-Havada soğutulan numune	7,71	1,60	11,16
3-Fırında soğutulan numune	7,47	1,69	10,95
0-Isıl işlemsiz	7,51	2,38	15,28

5.2.3.3. 90 dereceli kumlama

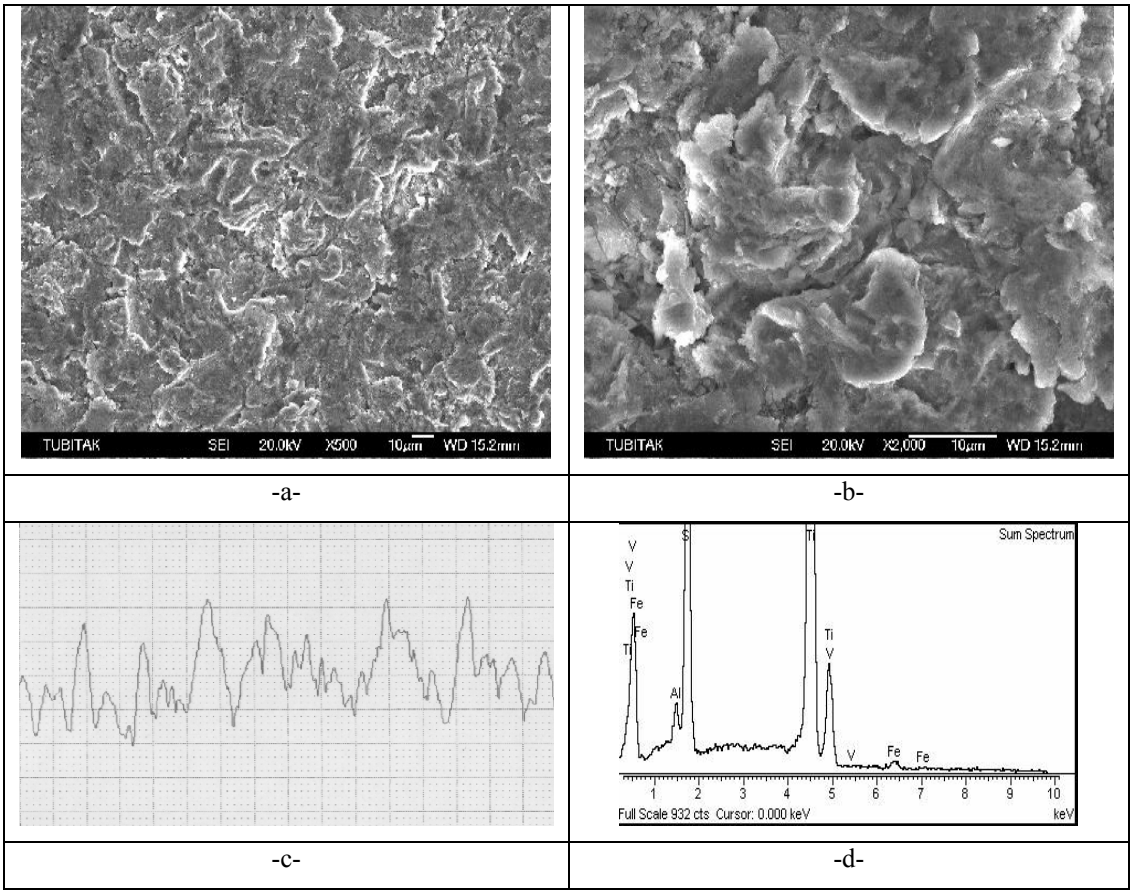
Tablo 5.10. 90 derece açı ile 2, 3 ve 4 bar basınç altında 30 sn kumlamanın ağırlık ölçümleri.

90° 2 bar 30 sn				90° 3 bar 30 sn			
işlem no	işlem öncesi ağırlık (gr)	işlem sonrası ağırlık (gr)	fark (gr)	işlem no	işlem öncesi ağırlık (gr)	işlem sonrası ağırlık (gr)	fark (gr)
1	5,9375	5,9289	0,0086	1	5,2470	5,2271	0,0199
2	5,8954	5,8857	0,0097	2	5,5527	5,5342	0,0185
3	5,6307	5,6224	0,0083	3	5,7847	5,7622	0,0225
4	5,9502	5,9413	0,0089	4	5,9818	5,9637	0,0181
5	5,4907	5,4828	0,0079	5	5,4513	5,4327	0,0186
6	6,0149	6,0048	0,0101	6	5,8148	5,7962	0,0186
7	5,4921	5,4842	0,0079	7	5,6726	5,6548	0,0178
8	5,7432	5,7340	0,0092	8	5,4240	5,4078	0,0162
9	5,8516	5,8428	0,0088	9	5,7561	5,7400	0,0161
işlemsiz	6,6742	6,6683	0,0059	işlemsiz	6,6714	6,6577	0,0137

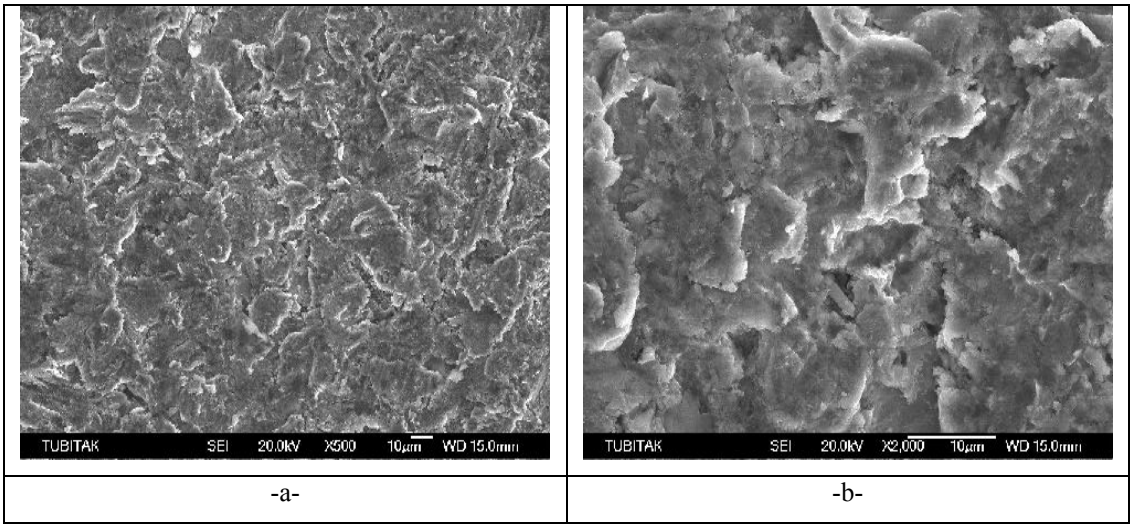
90° 4 bar 30 sn			
işlem no	işlem öncesi ağırlık (gr)	işlem sonrası ağırlık (gr)	fark (gr)
1	5,6090	5,5807	0,0283
2	6,0040	5,9713	0,0327
3	5,5772	5,5417	0,0355
4	5,0835	5,0542	0,0293
5	5,7883	5,7596	0,0287
6	5,9208	5,8879	0,0329
7	5,1678	5,1377	0,0301
8	5,6013	5,5727	0,0286
9	5,7526	5,7267	0,0259
İşlemsiz	6,6456	6,6187	0,0269



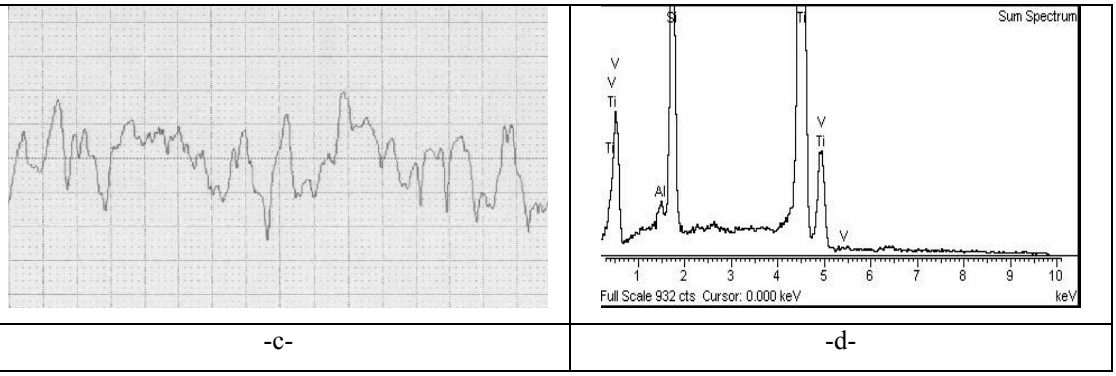
Şekil 5.68. 90 derece kumlamada ısıl işlem türüne göre her basınç değeri için ağırlık kaybı farkları.



Şekil 5.69. Isıl işlem yapılmamış numunenin 90 derece açı ile 4 bar kumlama bulguları. 500 büyütme (a) ve 2000 büyütmede (b) SEM görüntüleri, yüzey pürüzlülük grafiği (c), EDS analizi (d).

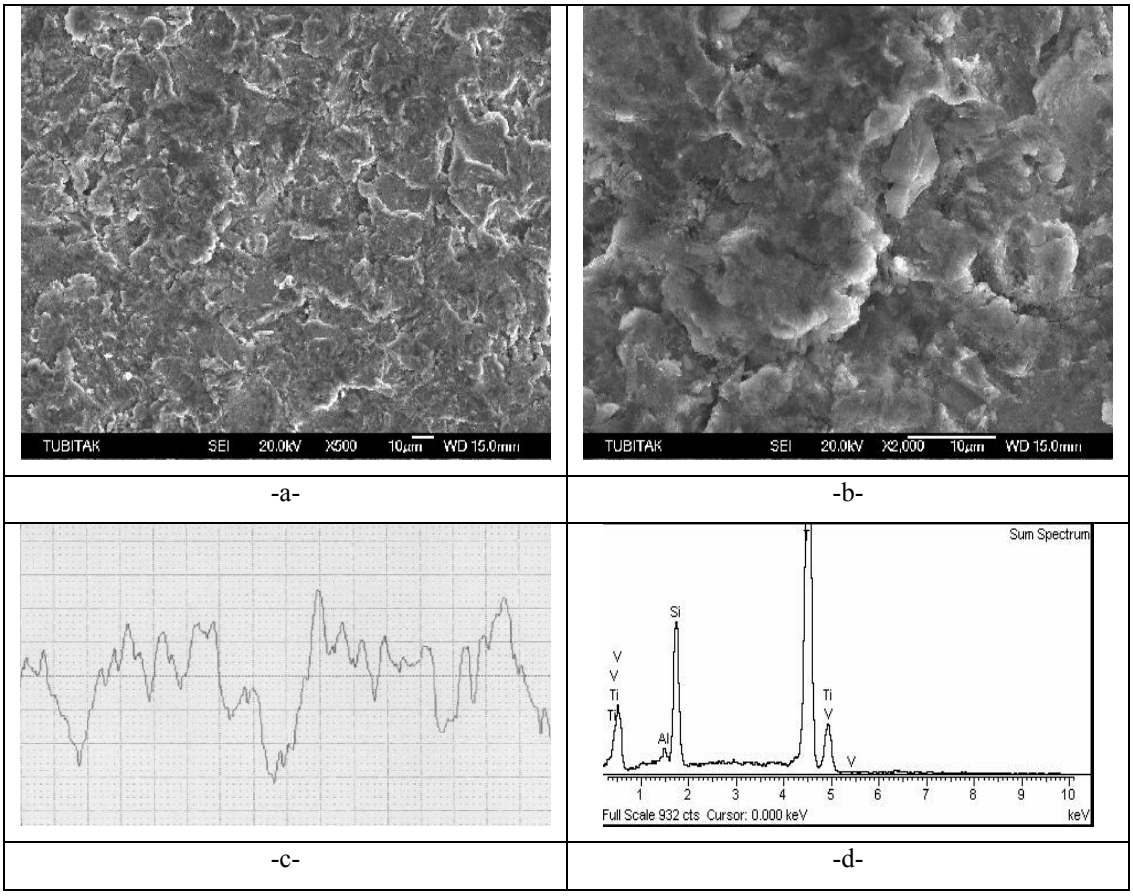


Şekil 5.70. Numune 1 ’in 90 derece açı ile 4 bar kumlama bulguları. 500 büyütme (a) ve 2000 büyütmede (b) SEM görüntüleri, yüzey pürüzlülük grafiği (c), EDS analizi (d).



-c- -d-

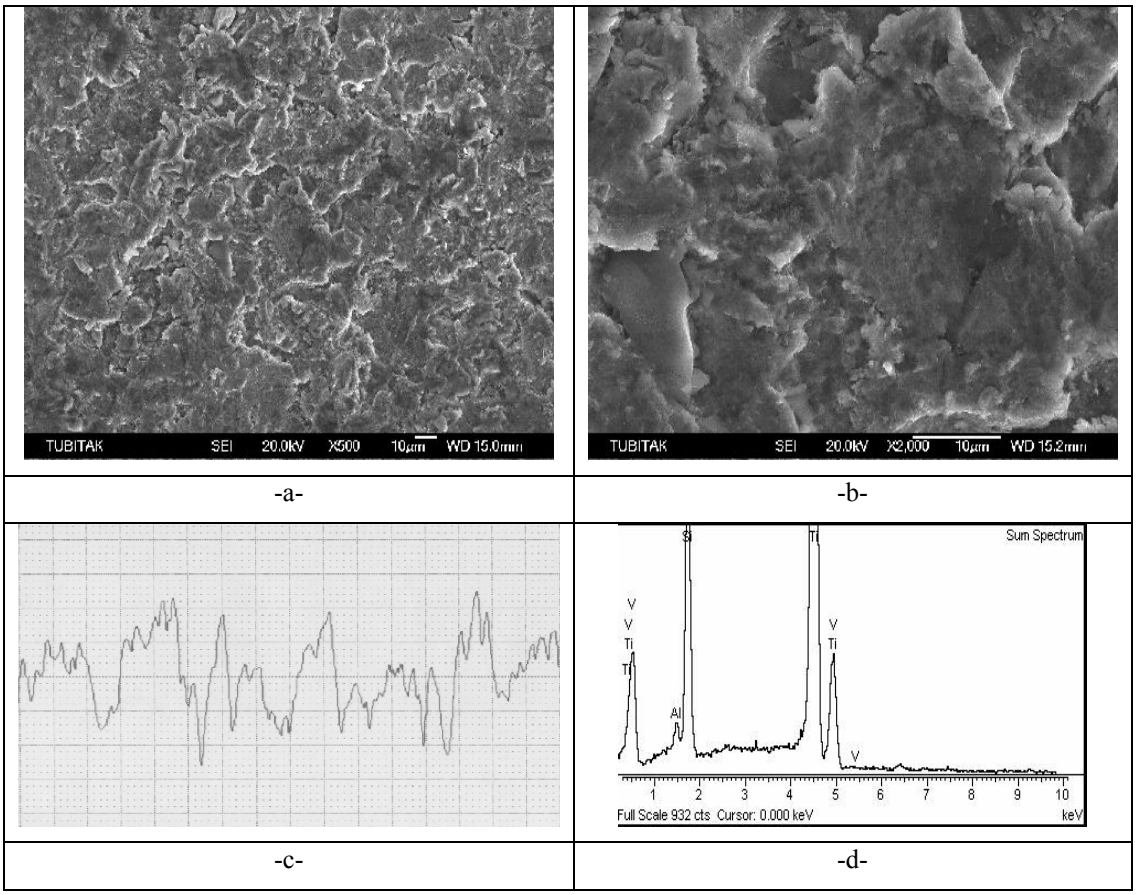
Şekil 5.70. (Devamı) Numune 1 ’in 90 derece açı ile 4 bar kumlama bulguları. 500 büyütme (a) ve 2000 büyütmede (b) SEM görüntüleri, yüzey pürüzlülük grafiği (c), EDS analizi (d).



-a- -b-

-c- -d-

Şekil 5.71. Numune 2 ’nin 90 derece açı ile 4 bar kumlama bulguları. 500 büyütme (a) ve 2000 büyütmede (b) SEM görüntüleri, yüzey pürüzlülük grafiği (c), EDS analizi (d).



Şekil 5.72. Numune 3 ’ün 90 derece açı ile 4 bar kumlama bulguları. 500 büyütme (a) ve 2000 büyütmede (b) SEM görüntüleri, yüzey pürüzlülük grafiği (c), EDS analizi (d).

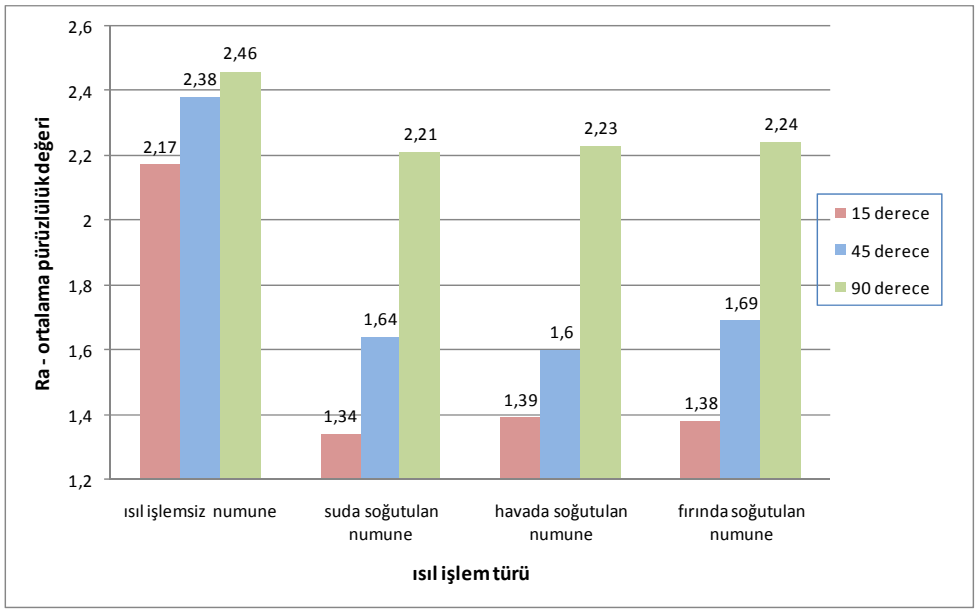
En düşük ağırlık kayıpları 90 derece açılı kumlamada gözlenmektedir (Tablo 5.10). Ağırlık kaybı değerleri birbirlerine çok yakın olmasıyla birlikte en fazla parça kaybı, sertliği diğerlerine nazaran daha az olan fırında soğulmuş numunede sağlanmıştır (Şekil 5.68). Bunun nedeninin malzeme yüzeyine dik olarak püskürtülen kum taneciklerinin yüzeye çarparak sekmesi, yüzeyde plastik deformasyona neden olması ve numuneden malzeme koparamaması olduğu Bölüm 5.1’de açıklanmıştır. SEM görüntüleri incelendiğinde kum partiküllerinin yüzeylerde derin çukurcuklar meydana getirdiği, hatta kum tanelerinin saplandığı ve yüzeyde kırıldığı gözlenmiştir (Şekil 5.69-5.72/a-b). Saplanan kum taneciklerinin oranı EDS analizi sonuçlarından da anlaşılabilmektedir (Şekil 5.69-5.72/d). Si oranlarının etkisi ısıl işlemsiz numune, fırında, havada ve suda soğutulan numune şeklinde sıralanabilir. Ayrıca yüzey pürüzlülüğü ölçümü sonuçlarından bu açı değerinde en pürüzlü numune yüzeyinin elde edildiği görülmektedir. Tablo 5.11’de 90 derece açı ile kumlanmış numunelerin

%Si miktarı ile Ra ve Ry pürüzlülük değerleri görülmektedir. Isıl işlem görmüş ve ısıl işlemsiz numunelerin pürüzlülük değerlerinin yakın olduğu görülmektedir.

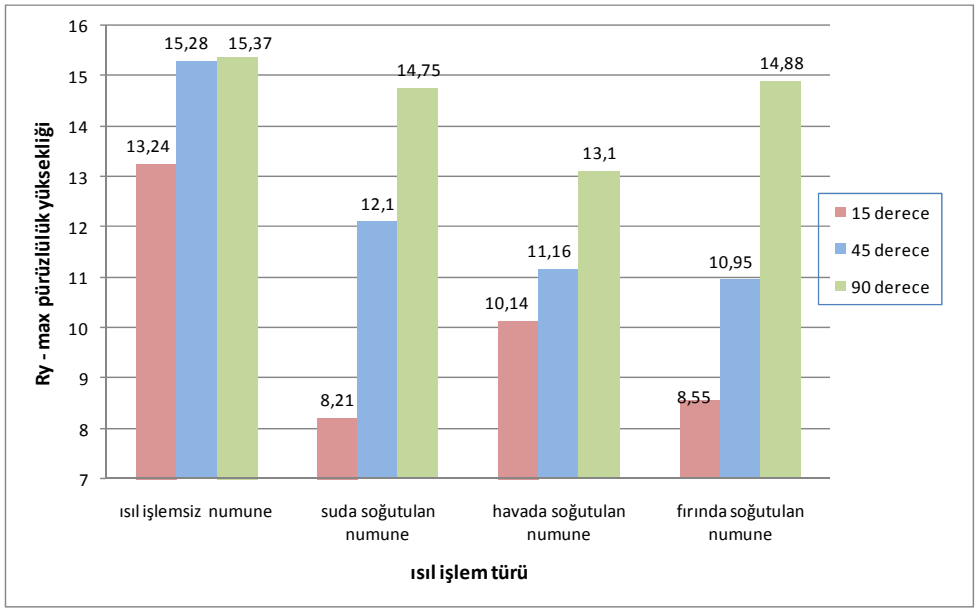
Tablo 5.11. 90 derece açı ve 4 bar ile yapılan kumlamanın ısıl işlem numuneleri yüzeyleri ölçülen % Si miktarı ile Ra ve Ry pürüzlülük değerleri.

	Si %	**Ra µm**	**Ry µm**
1-Suda soğutulan numune	17,18	2,21	14,75
2-Havada soğutulan numune	16,44	2,23	13,10
3-Fırında soğutulan numune	14,06	2,24	14,88
0-Isıl işlemsiz	19,17	2,46	15,37

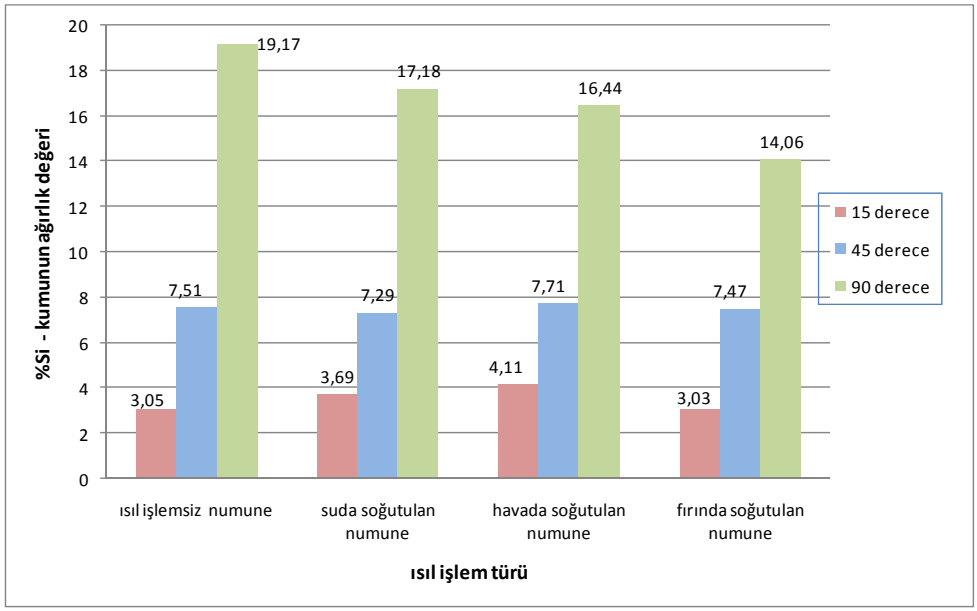
Artan açı ile Ra ve Ry değerlerindeki artış Şekil 5.73 ve Şekil 5.74'den görülebilmektedir. Kumlama çalışmalarında numunelerin sertliği ile Ra arasında ters bir orantı olduğu söylenebilinir. Ayrıca Şekil 5.75'den görülebileceği gibi artan açı değeri ile saplanan kum miktarında da artış olmaktadır.



Şekil 5.73. Isıl işlemli numunelerde ortalama pürüzlülük değerinin değişen kumlama açısına göre değişimi.



Şekil 5.74. Isıl işlemli numunelerde max. pürüzlülük yüksekliğinin değişen kumlama açısına göre değişimi.

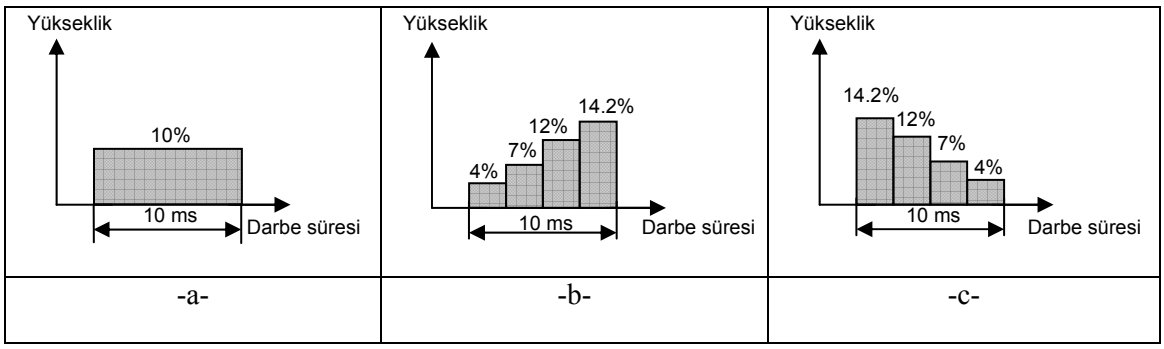


Şekil 5.75. Isıl işlemli numunelerde saplanan kum ağırlığı değerinin değişen kumlama açısına göre değişimi.

5.3. Lazer-Gaz Nitrürasyon Çalışması Bulguları

Bu çalışma; sadece azot veya sadece oksijen içermeyen, laboratuar atmosferinde gerçekleştirilen lazer-gaz nitrürasyon işlemini kapsamaktadır. Lazer-gaz nitrürasyon çalışması sırasında hiç bir gaz akışı sağlanmamıştır. Böylece TiN oluşumunun yanı sıra TiO_2 oluşması da yüksek olasılıkla beklenir. Fakat TiO_2 oluşumunun işlenmiş yüzeyler üzerinde hiçbir riski yoktur. Aslında TiO_2'nin birçok yararlı özelliklerini elde etmek mümkündür. Bu işlemin bir avantajı da TiN ve TiO_2'nin meydana gelmesinde gaz akışının yapaylığının önüne geçilmesinin sağlanmasıdır. Böylece kararlı laboratuar atmosferi altında TiN ve TiO_2 oluşumu, nitrürleme ve oksitleme niteliklerinde sadece lazer parametrelerinin etkisinin incelenmesini mümkün kılar.

Lazer ışınının enerji seviyesi, darbe frekansı ve darbe şekli gibi parametrelerinin etkisini incelemek amacı ile Şekil 5.76'da gösterilen üç değişik darbe tipi seçilmiştir. Bu parametreler Tablo 5.12'de gösterilen hazırlanmış plan kullanılarak numunelere uygulanmıştır.



Şekil 5.76. Numunelere uygulanan lazer darbe şekilleri.
a. dikdörtgen tipi, b. artan-üçgen tipi, c. azalan-üçgen tipi.

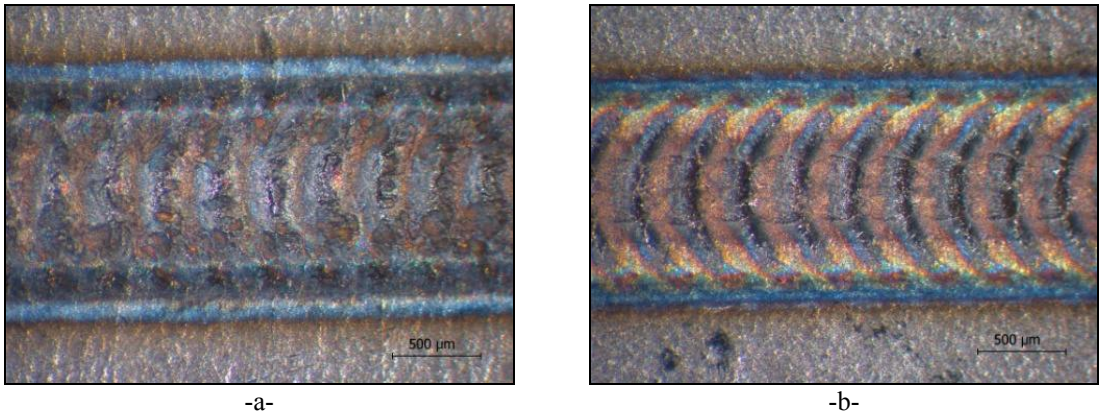
Birinci grupta (Grup A) dikdörtgen lazer darbeleri kullanılmıştır. Darbe süresi 10 ms, tekil darbenin yüksekliği %10 dur. Toplam darbe enerjisi 3.25 J'dür. Grup A'nın diğer parametreleri Tablo 5.12'den görülebilir. İkinci grup (Grup B) Grup A'ya benzemektedir, sadece darbe şekli değişiktir. Darbe süresi 2.5 ms olan 4 özgün dikdörtgen darbenin bileşimi olan artan-üçgen tipi darbeler Grup B'ye uygulanmıştır. Toplam darbe süresi Grup A'da benzer olduğu gibi 10 ms'dir. Grup C, Grup B ile benzer özelliklere sahiptir. Ana fark; Grup C'de azalan-üçgen tipi lazer darbeleri kullanılmıştır. Tablo 5.12'nin birinci sütunu numunelerin kodlarını göstermektedir. Tablo 5.12'de yapılan kodlama test sonuçlarını kolaylıkla kontrol etmenize yardımcı

olacaktır. Örneğin A20, dikdörtgen tipi (Grup A) ve dalga frekansı 20 Hz olan lazer darbesi demektir.

Tablo 5.12. Lazer-gaz nitrürasyonu parametrelerinin ayrıntıları.

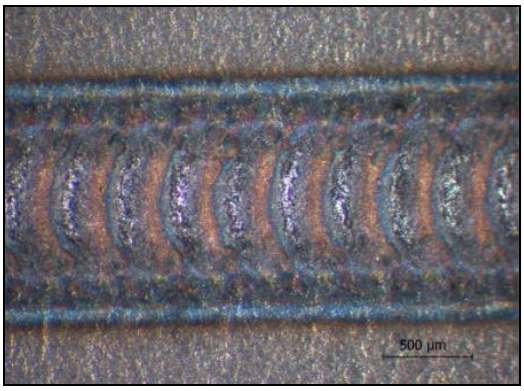
Numune Kodu	Tekrarlama Hızı (Hz)	Darbe Tipi	Lazer Kafasının Hızı (m/s)	Grubun Toplam Darbe Enerjisi (J)
A20	20	Grup A	5	3.25
A30	30		5	3.25
A40	40		5	3.25
A60	60		5	3.25
A80	80		5	3.25
A100	100		5	3.25
B20	20	Grup B	5	3.25
B30	30		5	3.25
B40	40		5	3.25
B60	60		5	3.25
B80	80		5	3.25
B100	100		5	3.25
C20	20	Grup C	5	3.25
C30	30		5	3.25
C40	40		5	3.25
C60	60		5	3.25
C80	80		5	3.25
C100	100		5	3.25

20 Hz darbe tekrarlama hızının uygulandığı A20, B20 ve C20 numunelerinin lazer işlenmiş bölgelerinin üstten görünüşü Şekil 5.77-a, b ve c ‘de sırasıyla gösterilmiştir. Aynı zamanda 100 Hz darbe tekrarlama hızının uygulandığı A100, B100 ve C100 numunelerinin lazer işlenmiş bölgelerinin üstten görünüşü Şekil 5.78-a, b ve c ‘de sırasıyla gösterilmiştir. İşlenmiş yüzeylerin üstten görünüşlerini karşılaştırarak darbe tekrarlama hızları (20 ve 100 Hz) arasındaki fark kolayca fark edilebilmektedir.



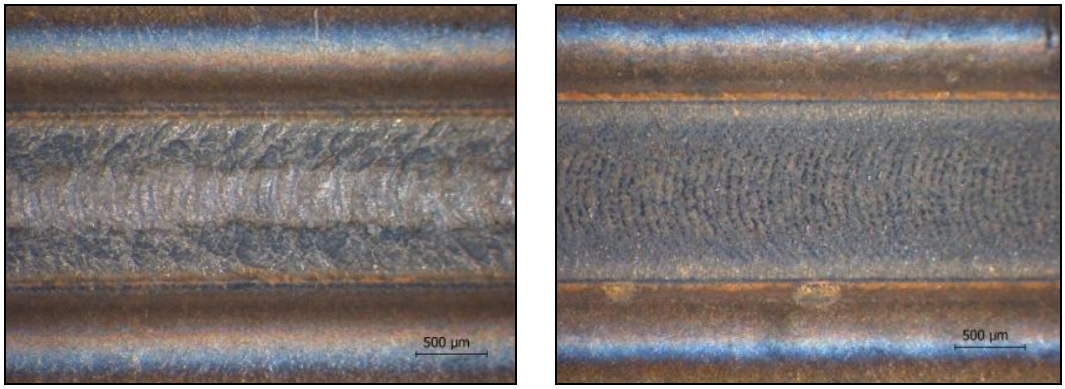
-a- -b-

Şekil 5.77. 20 Hz’de lazer işlenmiş bölgelerin üstten görünüşleri. a-A20, b-B20, c-C20.

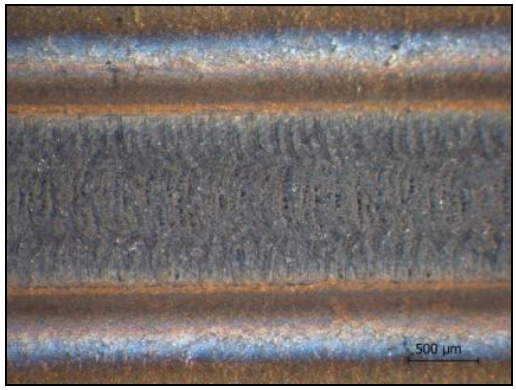


-c-

Şekil 5.77. (Devam) 20 Hz'de lazer işlenmiş bölgelerin üstten görünüşleri. a-A20, b-B20, c-C20.



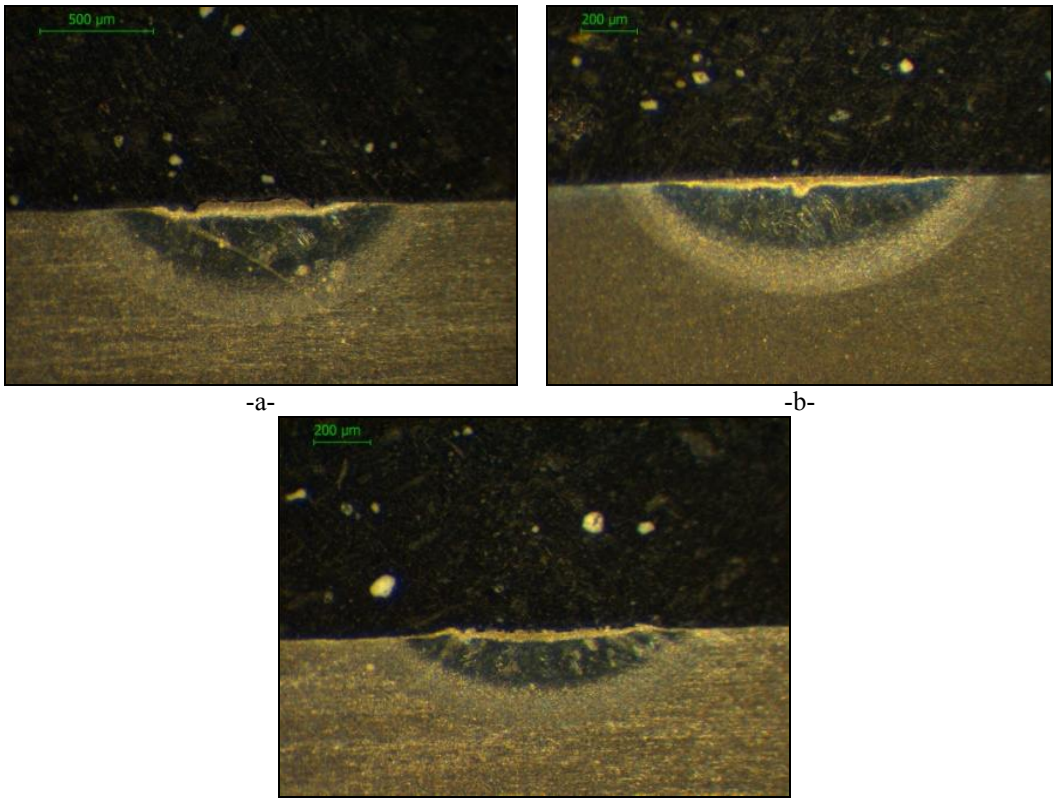
-a- -b-



-c-

Şekil 5.78. 100 Hz'de lazer işlenmiş bölgelerin üstten görünüşleri. a-A100, b-B100, c-C100.

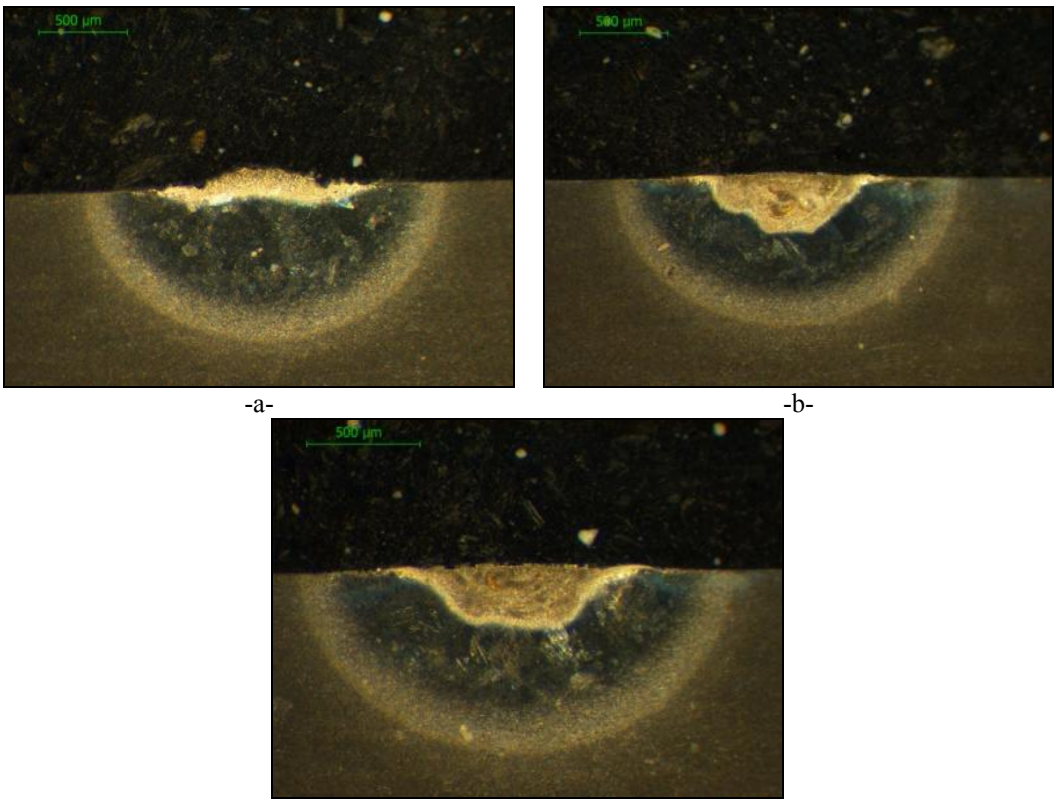
20 ve 100 Hz darbe tekrarlama hızlı lazer işleme numunelerinin dikey kesiti (Şekil 4.6'da tanımlandığı gibi hazırlanan) Şekil 5.79 ve Şekil 5.80'de sırasıyla gösterilmiştir. A20, B20 ve C20 numunelerinin enine kesiti Şekil 5.79-a, b ve c 'de sırasıyla sunulmuştur. Aynı zamanda A100, B100 ve C100 numuneleri de Şekil 5.80-a, b ve c 'de sırasıyla sunulmuştur.



-a- -b-

-c-

Şekil 5.79. 20 Hz'de lazer işlenmiş bölgelerin enine kesitleri. a-A20, b-B20, c-C20



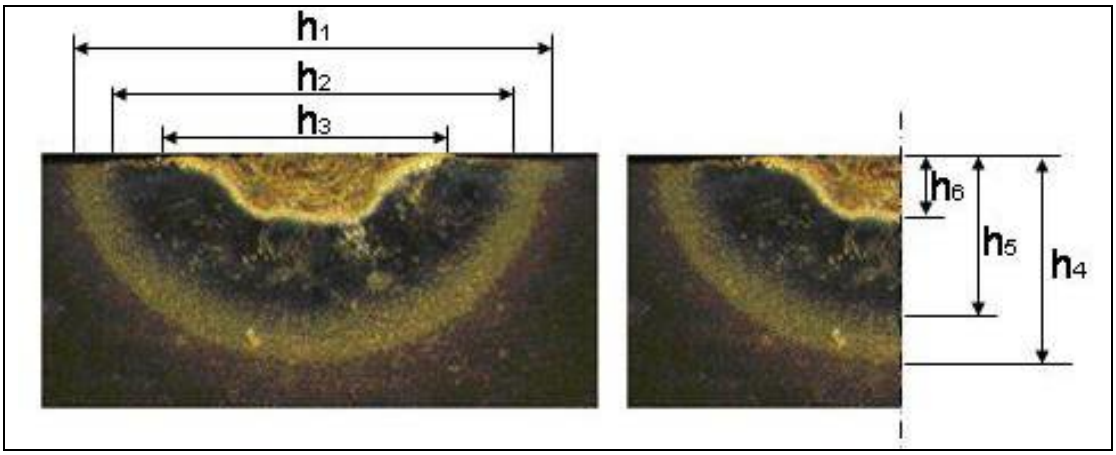
-a- -b-

-c-

Şekil 5.80. 100 Hz'de lazer işlenmiş bölgelerin enine kesitleri. a-A100, b-B100, c-C100

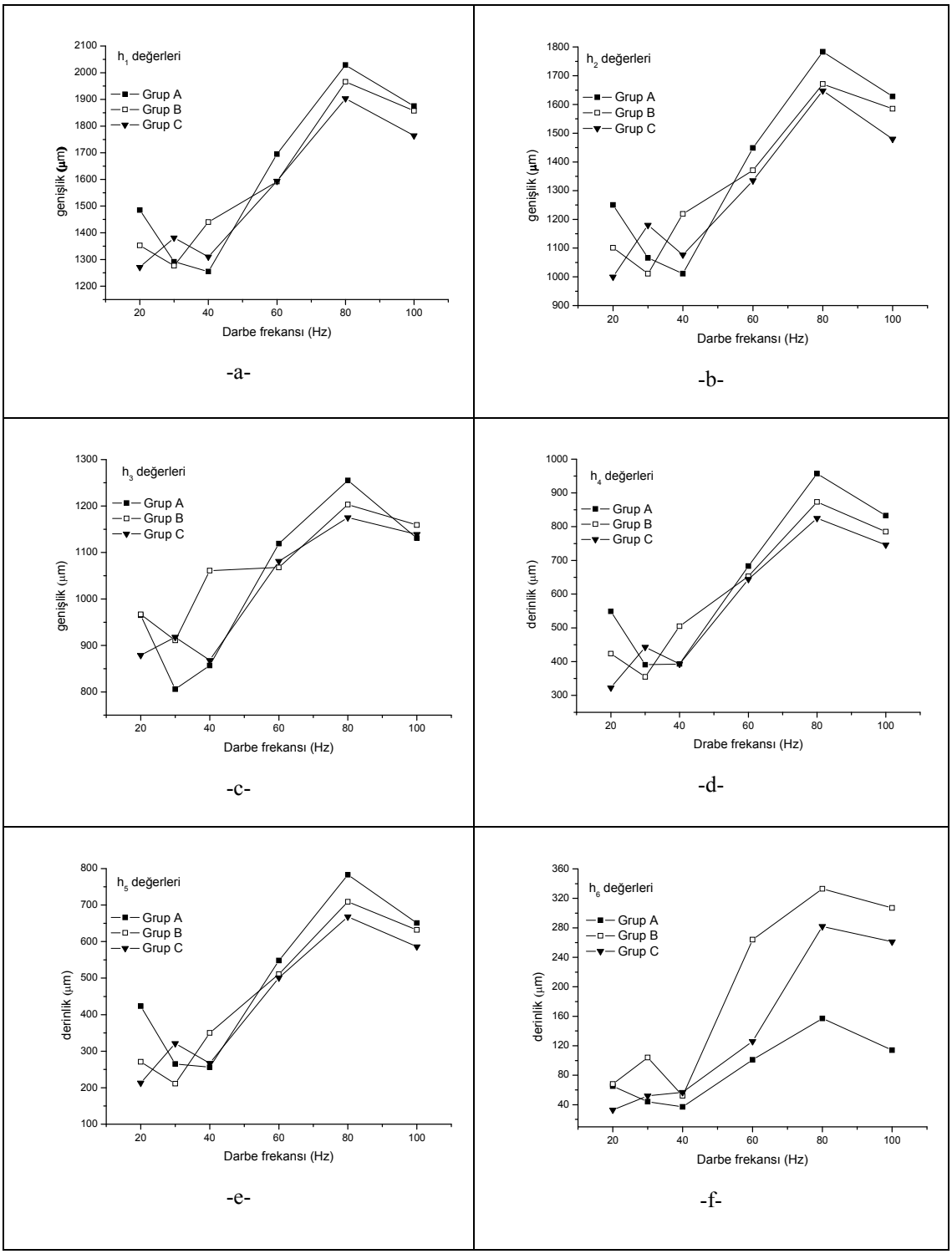
Şekil 5.77 ve 5.78, Şekil 5.79 ve 5.80'nin kıyaslanması; yüzeye lazer işleme ve numunelerdeki kesit nufuziyeti hakkında çok fazla bilgi vermektedir. Çok ince Ti-N ve Ti-O tabaka oluşumu içeren Şekil 5.79'dan yüzeydeki yeni oluşumları belirlemek çok kolaydır. Aynı zamanda diğer ısıdan etkilenmiş bölgeler, oluşumlar ve ölçüler Şekil 5.79'da görülebilir. Burada A, B ve C gruplarının enine kesitlerinde dikkate değer farkların olmadığı söylenebilir.

20 Hz'ye kıyasla 100 Hz'lik darbe tekrarlama hızı altında, kalın Ti-N ve Ti-O tabakalarına Şekil 5.80'de ulaşılmıştır. Ayrıca Şekil 5.80'de A, B ve C grupları arasındaki Ti-N ve Ti-O tabakalarında, diğer ısıdan etkilenmiş bölgelerin şekillerinde ve bunların ölçülerinde dikkate değer farklar görülmektedir.



Şekil 5.81. Lazer işlenmiş bölgelerin ölçüleri.

Lazer parametrelerinin lazer işleme bölgelerindeki ölçü, derinlik ve genişliklerin etkisini kesin olarak analiz etmek amacıyla büyüklükler h_1, h_2, h_3, h_4, h_5 ve h_6 olarak sınıflandırılmıştır. Şekil 5.81'de gösterildiği gibi, h_1, h_2 ve h_3 değerleri Ti-N ve Ti-O tabakalarının, ara bölgenin ve ısıdan etkilenmiş bölgenin genişliklerini temsil etmektedir. Ayrıca h_4, h_5 ve h_6 değerleri de sırasıyla Ti-N ve Ti-O tabakalarının, ara bölgenin ve ısıdan etkilenmiş bölgenin derinliklerini temsil etmektedir.



Şekil 5.82. Her grup için darbe frekansının fonksiyonun lazer işlenmiş bölgelerin genişlik ve derinlikleri.

Şekil 5.82-a, Ti-N ve Ti-O tabakalarının genişliğindeki değişimini tanımlamaktadır. h_1'in genişliği, 80 Hz'e kadar, lazer darbe frekanslarının artışı ile artmaktadır. Şekil 5.82-a'da iki önemli bölge gözlenmektedir. 20–40 Hz frekans aralığında, h_1'in

genişliğindeki değişiklik önemsenecek miktarda değildir. Genel olarak, yaklaşık eşit değerler etrafında dalgalandıkları varsayılabilir. Nitrürleme sürecinin, TiN fazının oluşum ve ayrışım arasındaki rekabet tarafından belirlendiği gözlenmiştir. Bu oluşum ve ayrışım arasındaki rekabet, 20–40 Hz frekansları arasındaki denge durumu TiN içeriğinin yüzdesinin belirli olması ile gerçekleştirilir. Bundan başka 40 ve 80 Hz arasındaki frekanslardaki bölgelerin genişlikleri h_1, h_2 ve h_3, doğrusal frekenslara karşı her grup için doğrusal bir artış göstermiştir (Şekil 5.82-a, b ve c). Buda TiN tabakasının oluşumunun, ayrışımından daha ileri olduğunun kanıtıdır.

80 Hz'den daha yüksek frekanslarda; bütün genişliklerde dikkate değer düşüş olduğu gözlenmektedir. Çok yüksek lazer güç yoğunluğu; TiN fazının indirgenmesiyle veya titanyum yüzeyinde şiddetli ergimesiyle bile sonuçlanabilir. Ancak bu olgu değişken lazer güç yoğunluğu ile içeriğin ve tabakanın mikroyapısının kontrol olasılığını gösterir. Bu eğilim h_1, h_2 ve h_3'ün lazer ışını frekansına karşı bağlantısını gösteren Şekil 5.82-a, b ve c 'de oluşturulmuş grafiklerde gösterilmiştir.

Şekil 5.82-a-e'den ölçülen h_1-h_5 değerlerinin genişlik ve derinlikleri, darbe tipi ile değişmediği gözlenmiştir. Bölgelerin genişlikleri Grup B değerlerine nazaran Grup A'da daha geniştir. Grup C'de daha düşük değerler gerçekleşmiştir. Aynı sonuçlar lazer işlenmiş alanın yüksekliği için de tamamen gözlenmiştir. 3 grupta da (A-dikdörtgen tipi, B-artan-üçgen tipi, C-azalan-üçgen tipi) her bir darbe (veya darbe grubu) aynı 10 ms'lik darbe uzunluğuna sahiptir. Aynı zamanda malzemeye iletilen tüm enerji ile arasında belirgin bir fark yoktur. Bu demek oluyor ki ısı dağılımı ve ısı iletim değerleri birbirlerine benzemektedir. Sonuç olarak lazer işleme bölgesinin genişlikleri ve derinlikleri çok benzer sonuçlar vermektedir.

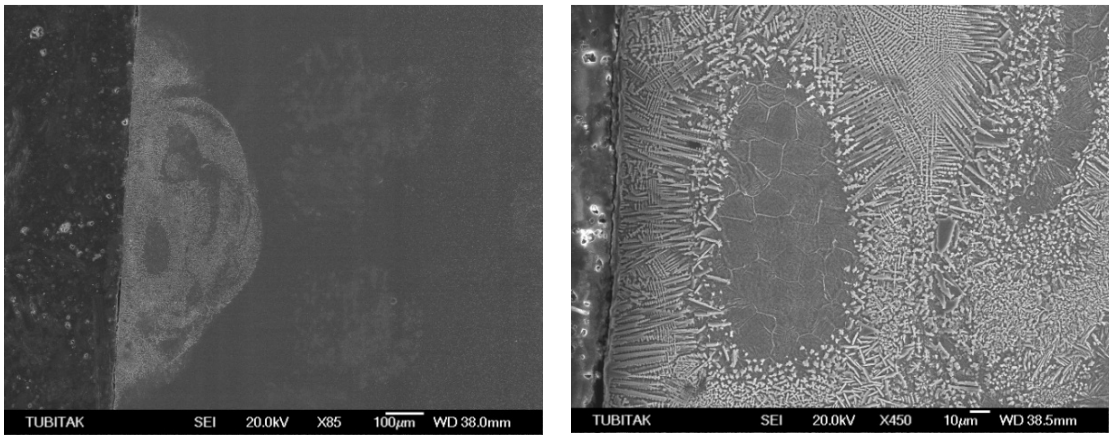
Diğer taraftan Şekil 5.82-f'de Ti-N ve Ti-O sert alaşım derinliğinin değerine ulaşan h_6 değerinde önemli bir fark gözlenmiştir. Bu derinliğin özel bir önemi vardır, çünkü aşınma performansı ile doğrudan ilgilidir. Diğer taraftan derin tabaka; yüksek servis ömrü, dengeli ve yoğun malzeme anlamına gelmemektedir.

Lazer enerjisi hedeflenen numuneye iletildiğinde bir dereceye kadar yüksek ısıtma ve soğutma süreci gerçekleşir. Eriyik havuzunun oluşma zamanı, aktivasyon zamanı ve soğuma zamanı kesinlikle ısı dağılımı ve eriyik malzemenin hidrodinamik doğası ile

ilgilidir. Bu parametreler TiN ve TiO_2 fazlarının oluşumunda kesinlikle önemlidir. "N" ve "O" atomlarının difüzyonu Ti6Al4V alaşımının eriyik havuzundan önemli derecede etkilenir. Ek olarak bu üçgen tipi lazer darbeleri dikdörtgen darbelere kıyasla fark edilecek şekilde derin (yaklaşık olarak 2,6 - 3 kat) kaplama alaşımına sahiptir. Numuneler artan-üçgen darbesi tipine maruz kaldıklarında, ilk darbe yollandıktan sonra küçük bir başlangıç eriyik havuzu oluşturur ve sonra ilerleyen darbeler ek olarak odaklanmış bölgenin ısısını yükseltir. Böylece Grup B darbeleri sırasında göreceli olarak kontrollü ısınma oluşur. Grup B değerlerindeki derinlikler, h6, Grup A'nın değerlerinden üç kat daha yüksektir. Ancak azalan-üçgen tipi darbe uygulamasında hedefe iletilen ilk darbeden sonra bir dereceye kadar daha yüksek ısınma meydana gelir. Eriyik bölge, oldukça düşük güç ile eşit darbe süresine sahip başka ardışık darbelere bağlıdır. Sonuç olarak TiN tabakasının oluşumu düşük soğutma hızına sahiptir. TiN ve TiO_2 fazlarının oluşumundaki eriyik metalin hidrodinamik hareketleri azalan-üçgen tipi lazer darbeleriyle zorlanır. Grup B değerlerindeki derinlikler, h6, Grup A değerlerinden 2,6 kat daha yüksektir.

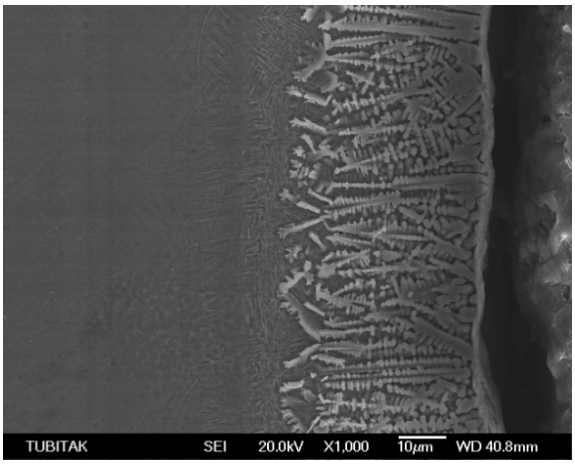
Başarılı bir lazer nitrürleme için, lazer ışını benek bölgesine yeterli saf azot sağlanmalıdır. Prensipte bu, birçok hidrodinamik faktörden etkilenebilen bir süreçtir. Azot akışının hızı, nozulun çevre şekli ve işlem ayarının kurulumu nihai sonuçları etkiler. Titanyum ve azot arasındaki bir sonraki reaksiyon; katılaşma fazındaki TiN'nin ayrışmasının ve azot atomlarının eriyik titanyuma difüzyonunu kontrol altına alınmasıdır. Sonuncu işlem çoğunlukla malzemelerin esas özellikleri ile ilgilidir.

Aslında sonuçlarımız göstermektedir ki hidrodinamik faktörler, lazer-uyarılmış gaz-katı reaksiyonunda çok önemli bir rol oynamaktadır. Lazer nitrürleme işlemini kontrol etme amacıyla iyi tanımlanmış ve kararlı koşul korunmalıdır. Özellikle gaz atmosferinin parametreleri kararlı bir değerde tutulmalıdır. Sadece bu koşul altında, tekrarlanabilir sonuçlar ve parametrelerin optimizasyonu gerçekleştirilebilir. Türbülanslı akıntı durumunda olduğu gibi, akış koşulları rasgele değişir. Bu, kararlı akış koşulunun lazer nitrürlemede neden kritik olduğunu açıklar. Şekil 5.83'de ergimiş metal içinde oluşan türbülanslar görülmektedir.

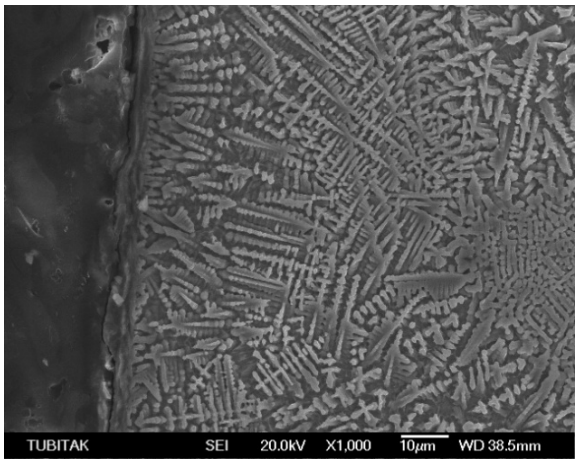


-a- -b-

Şekil 5.83. Lazer işlenmiş bölgede oluşan türbülansların SEM görüntüleri. a-85X b-450X.



Şekil 5.84. Lazer-gaz nitrürlenmiş numunenin (A20) SEM görüntüsü görülmektedir.



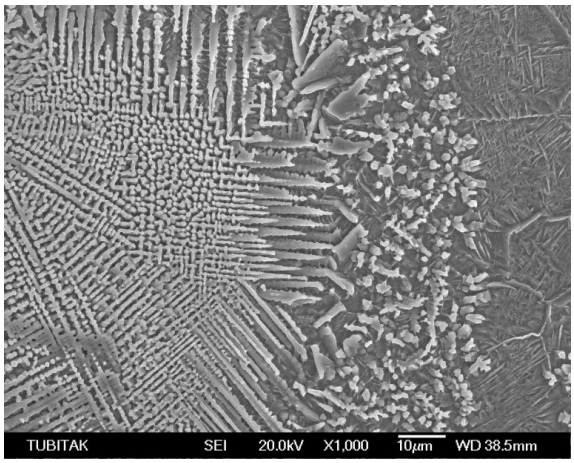
Şekil 5.85. Lazer-gaz nitrürlenmiş numunenin (C80) SEM görüntüsü görülmektedir.

Şekil 5.84'de dikdörtgen tipi 20 Hz (A20) lazer darbesi sonucu oluşan nitrür bölgesi görülmektedir. Sağ taraf numunenin üst tarafını göstermektedir. Çok ince TiN yüzey tabakası numunenin üst kısmında görülmektedir. Yaklaşık olarak birbirlerine paralel TiN dentritleri yüzeyden içeriye doğru uzamışlardır. Ayrıca 1000 büyütmede TiN dentritlerinin altındaki ara bölge görülebilmektedir.

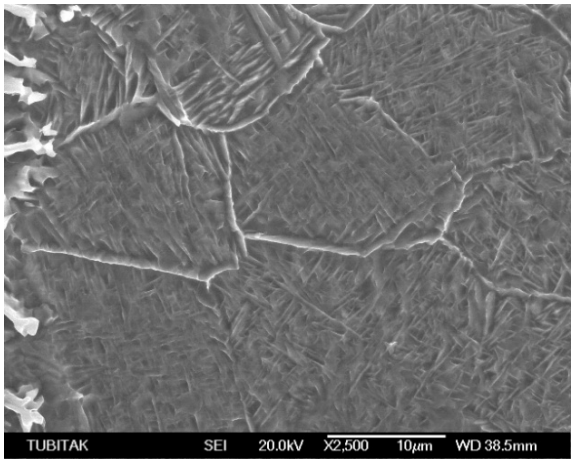
Şekil 5.85'de azalan-üçgen tipi 80 Hz (C80) lazer darbesi sonucu oluşan nitrür bölgesi görülmektedir. Sol taraf numunenin üst tarafını göstermektedir. Şekil 5.84 ile aralarındaki esas fark, 1000 büyütme altında çok fazla rastgele yönlenmiş TiN dentritlerinin olduğunun görülebilmesidir.

Şekil 5.84 ve Şekil 5.85 göstermektedir ki; katılaşma modu, sütunsal dentritlerden dolayı değişkenlik gösterir ve sonunda, yapısal aşırı soğuma derecesi olarak, eşeksenli dentritik artışa devam eder. Dentritlerin (sütunsal ve eşeksenli) ve sıvı fazın bir arada olduğu bölge lapa (yumuşak) bölge olarak adlandırılır.

Şunu belirtmek ilginçtir ki yapısal aşırı soğumanın çok yüksek olduğu derecede lapa bölge genişleme gösterir ve eşeksenli dentritleri çekirdekleştirmek, sütunsal dentritleri esnetmekten daha kolaydır.

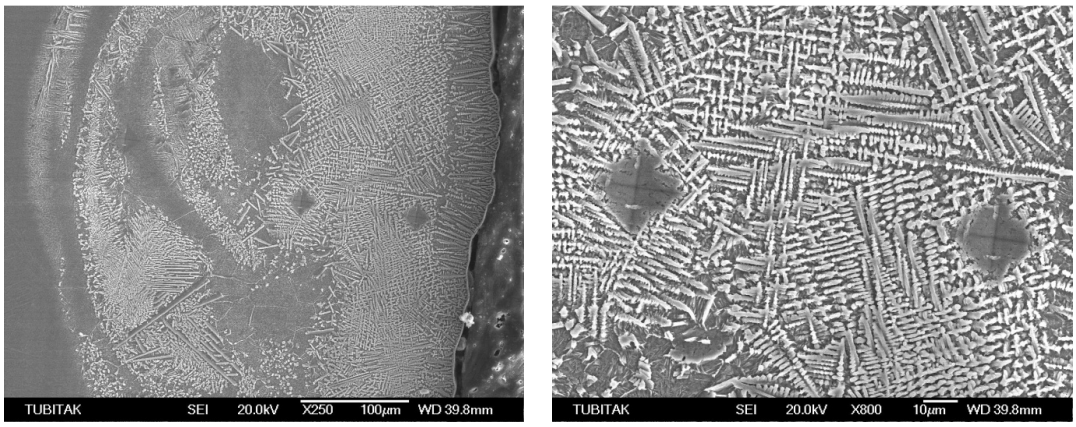


Şekil 5.86. Nitrürlenmiş bölge, ara bölge ve ısıdan etkilenmiş bölge.



Şekil 5.87. TiN dentritlerinin altında (nitritlenmiş tabaka) 2500 büyütmede ara bölge görülmektedir.

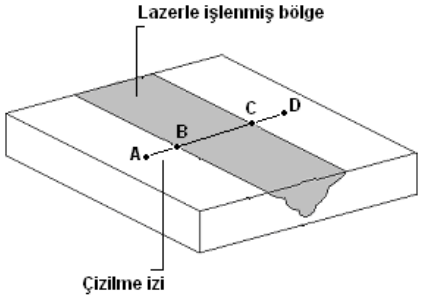
Lazer-gaz nitrürleme işlemiyle yüzey işleme tamamlandıktan sonra 4 değişik bölge meydana gelir. Şekil 5.86'da bu bölgelerin sınırları net bir biçimde görülebilmektedir. Numunenin yüzeyinde oluşturulan dışsal tabakaya "nitrürlenmiş bölge" adı verilir. Bu tabakayı "ara bölge" takip eder. Şekil 5.86'de gösterildiği gibi bu bölgeler SEM'de tanımlanmıştır. Şekil 5.87 lazer ışınına maruz kaldıktan sonra; eriyiğin son sınırlarını ve oluşturulmuş yeni bileşimlerle katılaşmış esas alaşımı göstermektedir. Bu tabakanın morfolojisinin TiN dentritlerinden oldukça farklı olduğu görülmektedir. Ara bölgenin altındaki ısıdan etkilenmiş bölgeler esas alaşımda herhangi bir değişik morfoloji göstermemektedir.



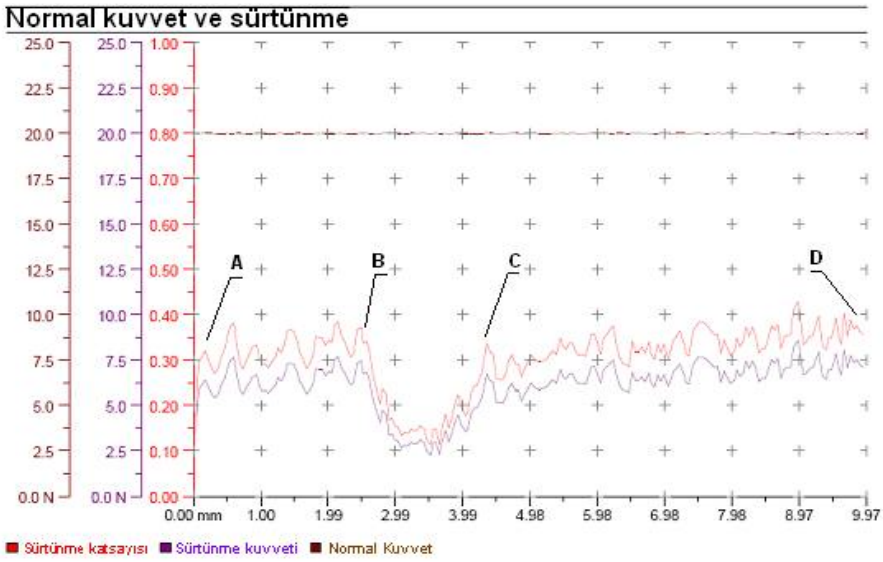
-a- -b-

Şekil 5.88. Nitrür tabakaları üzerinden alınan vickers sertliği izleri. a-280X b-800X

Sertlik ölçümleri 2,942N (HV 0,3) test yükü altında Zwick mikrosertlik cihazı ile yapılmıştır. Lazer nitrürlenmiş tabakanın mikrosertlik değeri 868±40HV olarak ölçülmüştür. Şekil 5.88 'de görüldüğü gibi, ölçülen sertlik değerlerine ait izlere SEM mikroskobunda tekrar bakılıp hangi bölgeye denk geldikleri kontrol edilerek değerlendirilmiştir. Sertlik değerleri, her grubun sertliğinin yaklaşık olarak benzediğini göstermektedir. Ara bölgenin mikrosertlik değeri 394±27HV olarak belirlenmiştir. Bu bölgeyi izleyen ısıdan etkilenmiş bölgenin (IEB) sertlik değeri 390±27HV olarak ölçülmüştür. Ara bölgeye ve ısıdan etkilenmiş bölgeye ait sertlik değerleri birbirlerine çok benzemektedir. Bundan başka Ti6Al4V alaşımının işlenmemiş tabakasının mikrosertliği 355 HV olarak belirlenmiştir. Lazer-gaz nitrürleme uygulamasıyla malzemenin işlenmemiş tabakasından 2,5 kat daha sert tabaka gerçekleştirildiği sonuçlardan çıkarılabilmektedir.



-a-



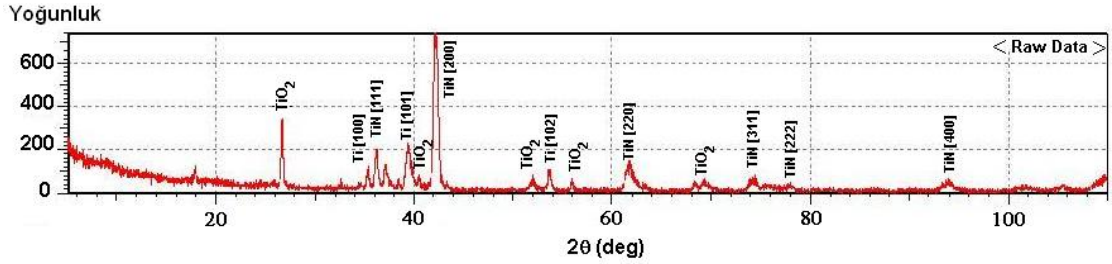
-b-

Şekil 5.89. B20 numunesine uygulanan yüzey çizilme direnci testi.
a) testin grafiksel gösterimi, b) test sonucu.

Bu çalışmada aynı zamanda alaşımın işlenmiş bölgelerinin tribolojik özelliklerini incelemek için scratch test (yüzey çizilme dayanımı testi) cihazı kullanılmıştır. Bu test bize işlenmiş bölgelerdeki aşınma direnci ile ilgili çok önemli bilgiler sağlamaktadır. Ek olarak, bu cihaz kullanılarak malzemenin yüzeyinin sürtünme katsayısı saptanabilmektedir.

İşlenmiş ve işlenmemiş tabakalara uygulanan ve 10 mm çizgi boyunca veri toplayan cihazdan alınan tipik çıktı Şekil 5.89'da gösterilmiştir. Scratch test (yüzey çizilme direnci testi) Şekil 5.89-a 'da görüldüğü gibi A noktasından başlamış ve D noktasında sonlanmıştır. Çizici uç B noktasında lazerle işlenmiş bölgeye girip C noktasında bu bölgeyi terk etmektedir. Bu esnada kaydedilen veriler, Şekil 5.89-b 'de ilgili noktalar işaret edilerek gösterilmiştir.

Çizgi boyunca sürtünme kuvveti, çizici uç ile etkileşiminden ve malzeme katmanına maruz kalmasından dolayı dalgalanmıştır. Çizici ucun yatay eksende ki pozisyonu kabaca 2.6 mm olarak, alaşım yüzeyinin sürtünme katsayısı ise 0.35 olarak belirlenmiştir. Çizici uç lazer ile işlenmiş bölge olan ısıdan etkilenmiş bölgeye (IEB) girdiğinde sürtünme kuvveti değerinde kayda değer bir düşüş gözlenir. Açıkça bu katmanın fiziksel olarak işlenmemiş bölgeden daha sert olduğu söylenebilir. İşlenmiş bölgelerin sürtünme kuvveti 1.15 olarak saptanmıştır. Çizici uç işlenmiş bölgeyi geçmeyi tamamladığında katsayı aniden artmıştır; bu, lazer nitrürleme ve oksitleme tarafından oluşturulan sert tabakanın geçilmesinin tamamlandığı ve yeni tabakanın farklı sürtünme kuvveti olduğu anlamına gelir. Ölçümler tekrar işlenmemiş bölgenin sürtünme katsayısı değeri olan 0.35'i gösterir.



Şekil 5.90. A20'nin X ışını analizi.

Nitrürlenmiş sert tabakanın lazer-gaz uygulamasıyla oluşturulup oluşturulmadığını incelemek için benzer işlenmiş numuneler X-Ray ile analiz edilmiştir ve tipik çıktı Şekil 5.90'de gösterilmiştir. Şekil 5.90; Ti6Al4V alaşımında lazer ışını, oksijen, azot ve eriyik havuzu kombinasyonunun etkileşiminden sonra yeni oluşturulan bileşiği açık bir biçimde göstermektedir. Bu X-Ray çıktısı gerçekleştirilen işlemin başarısını onaylar ve özetler.

BÖLÜM 6. SONUÇLAR

6.1. Kumlama

- Ti6Al4V malzemenin yüzeyinin istenilen pürüzlülük değerine sahip olabilmesi kumlama yöntemi ile sağlanabilmiştir.
- Kumlama esnasında kumun yüzeye çarpma açısının çok etkili olduğu gözlenmiştir.
- Gerek elde edilen ağırlık kayıplarının gerekse yüzey pürüzlülük değerlerinin yüzey çarpma açısı değerleri ile çok yakından ilişkili olduğu anlaşılmaktadır.
- Kumların yüzeye çarpma açıları malzeme ile etkileşme mekanizmalarını etkilemektedir.
- Düşük açılarda abraziv ağırlıklı, yüzeyin çizilmesi şeklinde deformasyonlar söz konusu iken geniş açılarda yüzeyin oyulması ve kum partiküllerinin yüzeye saplanması gözlenmektedir.

6.2. Isıl İşlem

- Normal koşullarda oda sıcaklığında α+β kristal yapısına sahip malzeme uygulanan termal işlemle birlikte α` (titanyum martenzit), iğnesel α, kaba plaka şeklinde α ve β kristal yapısına dönüşmekle birlikte malzemenin yüzeysel özellikleri değişmiştir.
- Isıl işlem öncesi orijinal numunenin sertliği termal işlemle birlikte yaklaşık üç kat oranında artmıştır.
- Isıl işlem öncesi orijinal numunede scratch test oluşturulan çizgi izi kalınlığı termal işlemle birlikte yaklaşık yarı yarıya düşmüştür.
- Artan sertlikle beraber yüzey çizilme dayanımı artarken sürtünme kuvveti katsayısı değerleri ve çizginin kalınlığı azalmaktadır.
- Numunelerin sertliği ile çizilme esnasında talaş oluşumu arasında da ters bir orantı vardır.
- Artan kumlama açısı ile ortalama yüzey pürüzlülük değeri olan Ra artarken kısmen numunelerin sertliği ile Ra arasında ters bir orantı olduğu söylenebilinir.

6.3. Lazer-Gaz Nitrürleme

- Lazer-gaz nitrürlenmiş bölgelerde elde edilen sertlik değerleri işlenmemiş bölgelerdekilerden 2,5 kat daha yüksektir. Böylece söz edilen alaşım ile tasarlanan ve kurulan, yüzeylerle temasa duyarlı endüstriyel parçalar; medikal ve endüstriyel uygulamalar için tatmin edici yüzey iyileştirmeleri sağlamak için kusursuzca Nd: YAG laser ile işlenebilir.
- İyileştirilmiş tabakadaki numunenin kesitindeki sertlik profili nitrojen konsantrasyon eğimine ve etkileşim zamanına çok bağlıdır.
- Lazer enerjisi hedef numuneye iletildiğinde orantılı olarak yüksek ısıtma ve soğutma süreçleri gerçekleşmektedir. Bu eriyik havuzun yaratma zamanı, etkinleştirme zamanı ve soğutma zamanı kesinlikle ısı dağılımı ve ergimiş metalin hidrodinamik yapısıyla ilişkilidir.
- Bu parametreler aynı zamanda TiN ve TiO_2 fazlarının şekillendirilmesinde çok önemlidir.
- N ve O atomlarının difüzyonu önemli derecede Ti6Al4V alaşımının eriyik havuzundan etkilenir.
- Üçgen tipi lazer darbeleri dikkat çekecek şekilde daha derin (yaklaşık olarak 2-3 kat) kaplama alaşımına sahiptir.
- Numuneler artan-üçgen tipi darbelere tipine maruz kaldıklarında, ilk darbe yollandıktan sonra bir başlangıç-küçük eriyik havuzu oluşur ve sonra dereceli artan vuruşlar odaklanmış bölgenin ısısını ilaveten arttırır. Böylece B tipi darbe işlemi sırasında diğerlerine nazaran ‘kontrollü ısıtma’ gerçekleştiği söylenebilir.
- Azalan-üçgen tipi darbe uygulamasında hedefe ilk darbe iletildikten sonra nispeten daha yüksek ısıtma gerçekleşir. Daha sonra eriyik bölge diğerine göre daha az güç ile eşit darbe zamanına sahip başka ardışık darbelere maruz kalır. Sonuç olarak TiN tabakasının oluşumunda düşük soğutma hızı olacaktır.
- TiN ve TiO_2 fazların oluşumundaki eriyik metallerin hidrodinamik hareketleri azalan-üçgen şeklindeki lazer darbeleriyle zorlanır.

KAYNAKLAR

1. Akman, E., " Ti6Al4V Titanyum alaşımlarının atımlı Nd:YAG lazeri kullanılarak kaynak edilmesi ve kaynak parametrelerinin belirlenmesi", Yüksek Lisans Tezi, ***Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, İzmit, (2006)

2. Özdemir, B., "Lazer ile titanyum ve magnezyum alaşımlarının işlenmesi ve kaynağı ", Bitirme Tezi, ***Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi,*** İzmit, (2006)

3. *Titanyum Alloys-Physical Properties*, http://www.azom.com/Details.asp?ArticleID=1341 , **(Ziyaret Tarihi: 5 Mayıs 2007)**

4. William F. Smith., "Structure and properties of engineering alloys" , ***McGraw-Hill International Editions***, 433-487 (1993)

5. M. Zitnansky, L. Caplovic , "Effect of the thermomechanical treatment on the structure of titanium alloy Ti6Al4V" ***Journal of Materials Processing Technology*** 157–158, 643–649 (2004)

6. Boyer, R., VVelsch, G. and Collings, E.W., "Materials properties handbook Titanium alloys" , ***ASM International,*** 483-491,606-620 (1994)

7. Leyens, C., Peters M, "Titanium and Titanium Alloys" , Wiley-VCH, (2003)

8. Boettcher, C, Bell, T. and Dong, H., "Surface engineering of Timet 550 with oxygen to form a rutile-based, wear resistant coating", Metallurgical and Materials Transactions A33, 1201-1211 (2002)

9. Bloyce, A., Qi, P.-Y., Dong, H. and Bell, T., "Surface modification of titanium alloys for combined improvements in corrosion and wear resistance", Surface and Coatings Technology, 107, 125-132 (1998)

10. Stachowiak, G.W. and Bachelor, A.W., "Engineering Tribology, Buttenvorth Heinemann", (2001)

11. Madencilik özel ihtisas komisyonu raporu,"Endüstriyel hammaddeler alt komisyonu genel endüstri mineralleri – titanyum", Ankara, (2001)

12. Brunette, D.M., TengwaU, B.,Textor, M. and Thomsen, P., "Titanium in Medicine", ***Springer Verlag***, 27-31,239-241 (2001)

13. International Titanium Association, http://www.titanium.org/ , **(Ziyaret Tarihi 7 Mayıs 2007)**

14. *Dişhekimliğinde Titanyum Uygulamaları*, http://www.ido.org.tr/dergiarsiv091.asp?ID=702 , **(Ziyaret Tarihi 8 Mayıs 2007)**

15. Tosun, T., "Titanyum İmplantlarda osseointegrasyon", http://www.implantoloji.info/makaleler/p2_articleid/14/p2_page/1/s , **(Ziyaret Tarihi 7 Mayıs 2007)**

16. Orhon, A. V., "Mimarlıkta titanyum", ***Yapı,*** 278, 82-86, (2005)

17. Erdem, M. S., Aydın, K., "Gaz türbinli uçak motorlarında titanyum alaşımlarının kullanımı", ***Mühendis ve Makine***, 558, 44-53, (2006)

18. Ensarioğlu, C., Çakır, M., C., "Titanyum ve alaşımlarının işlenebilirlik etüdü ", ***Mühendis ve Makine***, 547, 36-46 , (2005)

19. Material Property Data, http://www.matweb.com , **(Ziyaret Tarihi 7 Mayıs 2007)**

20. Zeng, L., Bieler, T.R., "Effects of working, heat treatment, and aging on microstructural evolution and crystallographic texture of α', α'', α'' and β phases in Ti–6Al–4V wire" ***Materials Science and Engineering*** A 392, 403–414, (2005)

21. Donachie, M.J., "Titanium A Technical Guide" ***ASM International***,55-65, 203-217, (2000)

22. Ezugwu, E.O. and Wang, Z.M., "Titanium Alloys and Their Machinability" , ***Jounal of Materials Processing Technology***, 262 (1997)

23. Hideki, Fujii "Strengthening of α+ β titanium alloys by thermomechanical processing" , ***Materials Science and Engineering*** A243,103–108 (1998)

24. Askeland, D.R., "The Science and Engineering of Materials" , ***VNR International***, USA (1994)

25. ASM Metals Handbook, Volume 04 "Heat Treating", (2004)

26. Tanrıöver, K., Taşçı, A., "Titanyum alaşımlarının ısıl işlemi", ***Makine Magazin***, 58 (1997)

27. ASM Metals Handbook, Volume 9, "Metallography and Microstructures", (2004)

28. http://www.saykar.net , **(Ziyaret Tarihi 20 Mayıs 2007)**

29. Sander, M., "A practical guide to the assessment of surface texture", (1991)

30. http://www.istasas.com.tr , **(Ziyaret Tarihi 20 Mayıs 2007)**

ÖZGEÇMİŞ

1982 yılında Eskişehir'de doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini İstanbul'da tamamladı. 2001 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nden 2005 yılında mezun oldu. 2005 – 2007 yılları arasında, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans öğrenimini tamamladı. 2007 yılından itibaren TÜBİTAK – Marmara Araştırma Merkezi, Malzeme Enstitüsünde Araştırmacı olarak görev yapmaktadır.