

## Toz metalurjik Ti6Al4V alaşımının bilyalı dövme sonrası yüzey ve yüzey altı mekanik ve mikroyapısal özelliklerinin incelenmesi

Emirhan Çalım<sup>1</sup>, Yasemin Yıldırım Avcu<sup>1</sup>, Eleftherios Iakovakis<sup>2</sup>, Eray Abakay<sup>3</sup>, Rıdvan Yamaoğlu<sup>4</sup>, Funda Gül Koç<sup>4</sup>, Mert Güney<sup>5</sup>, Egemen Avcu<sup>1,6\*</sup>

<sup>1</sup> Makine Mühendisliği Bölümü, Kocaeli Üniversitesi, Türkiye

<sup>2</sup> Makine Havacılık ve İnşaat Mühendisliği Bölümü, Manchester Üniversitesi, İngiltere

<sup>3</sup> Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Sakarya Üniversitesi, Türkiye

<sup>4</sup> Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Kocaeli Üniversitesi, Türkiye

<sup>5</sup> İnşaat ve Çevre Mühendisliği Bölümü, Nazarbayev Üniversitesi, Kazakistan

<sup>6\*</sup> Ford Otosan Meslek Yüksek Okulu, Kocaeli Üniversitesi, Türkiye

\* [avcuegemen@gmail.com](mailto:avcuegemen@gmail.com) Başlıca yazarın mail adresi

**Özet** – Ti6Al4V alaşımı sahip olduğu yüksek mekanik özellikler, biyoyumluluk ve üstün korozyon direnci sayesinde havacılık, otomotiv ve biyomedikal alanlarında sıklıkla tercih edilmektedir. Bu çalışmada toz metalurjik Ti6Al4V alaşımının bilyalı dövme sonrası yüzey ve yüzey altı mekanik ve mikroyapısal özellikleri incelenmiştir. İlk olarak toz metalürjisiyle üretilen numunelerin Arşimet yöntemiyle yoğunluk ölçümleri gerçekleştirilmiş ve numunelerin yüksek yoğunlukta (>%99) olduğu belirlenmiştir. Sonrasında numuneler özel tasarım otomatik kontrollü bilyalı dövme düzeneği kullanılarak dövülmüştür. Daha sonra numunelerin kesiti alınarak, 30 µm derinlikten başlanarak 900 × 540 µm<sup>2</sup>'lik bir alandan 200 adet mikrosertlik ölçümü yapılmıştır. Elde edilen sertlik değerleri Matlab® üzerinde geliştirilen bir algoritmayla analiz edilerek sertlik haritaları oluşturulmuştur. Sertlik ölçümleri sonucunda numunelerin merkezindeki sertlik değerleri 380 HV<sub>0,2</sub> iken 180 µm derinlikte yaklaşık 440 HV<sub>0,2</sub> olarak ölçülmüş olup sertlikte %16 artış tespit edilmiştir. Ayrıca bilyalı dövme işleminin malzeme yüzeyinden 300 µm derinliğe kadar etki ettiği belirlenmiştir. Taramalı elektron mikroskobu incelemeleri, bilyalı dövme işleminin numune yüzeyi ve yüzey altında plastik deformasyona sebep olduğunu ve buna bağlı olarak tane incelenmesi gerçeğleştirdiğini göstermiştir. Bilyalı dövme işleminin numunelerin yüzeyinde meydana getirdiği plastik deformasyon taramalı elektron mikroskobu ve 3 boyutlu optik profilometre ile ortaya çıkarılmıştır. Çalışmada kullanılan sertlik haritalama metodolojisinin farklı alaşım grupları için bilyalı dövme sonrası değişen mekanik özelliklerin derinlemesine incelenmesinde faydalı olacağı sonucuna varılmıştır.

**Anahtar Kelimeler** – Bilyalı Dövme, Mikrosertlik Haritalama, Toz Metalurjisi, Yüzey Morfolojisi, Mikroyapı

### I. GİRİŞ

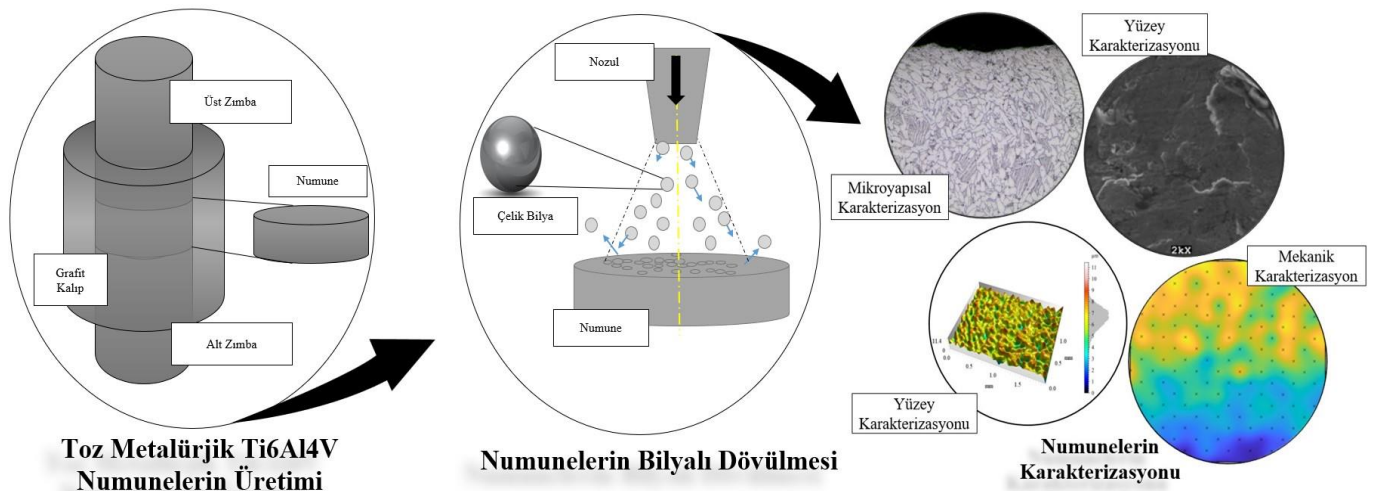
Titanyum alaşımları, biyoyumlulukları, yüksek korozyon dirençleri ve üstün spesifik mukavemet değerleri sayesinde havacılık, otomotiv ve biyomedikal endüstrilerinde sıklıkla tercih edilmektedir [1], [2]. Ayrıca titanyum alaşımlarının elastiste modülü paslanmaz çelikler veya Co-Cr alaşımları gibi muadil malzemelere göre kemiğinkine daha yakındır ve bu durum implant-kemik ilişkisinin bozulma riskinde azalma sağlamaktadır [3]. Titanyum alaşımları içerisinde

Ti6Al4V alaşımı, biyomedikal alanda en yüksek performansı veren ve bu nedenle en sık tercih edilen alaşımlardandır. Ancak bu üstün özelliklerine kıyasla titanyum alaşımlarının tribolojik ve mekanik yüzey özellikleri zayıftır. Bu özelliklerin iyileştirilmesinde bilyalı dövme [4], vibro-mekanik tekstürleme [5], lazer ile dövme [6], lazer ışını işleme [7], ultrasonik nanokristalin yüzey modifikasyonu [8], elektroerozyon yöntemi [9], mekanik yüzey aşındırma [10], kumlama [11] ve mikro işleme [12] gibi yöntemler kullanılmaktadır.

Bilyalı dövme, minimum yüzey hasarı oluşturması, yüzey altı bölgede kalıntı basma gerilmesi oluşturarak yorulma ömrünü arttırması, uygulandığı parçanın şekil sınırlamasının olmaması ve düşük maliyetli olması gibi sebeplerle diğer metotlar arasında öne çıkmaktadır. Ancak, literatür incelendiğinde bilyalı dövmenin kullanım amacının daha çok yorulma ömrünü geliştirmek olduğu ve bir yüzey modifikasyon yöntemi olarak daha az tercih edildiği görülmektedir. Bunun yanı sıra, bilyalı dövülen malzemelerin sertlik gibi yüzey altındaki mekanik özellik değişimleri genellikle çizgisel yöntemlerle yapılmaktadır [13], [14]. Ancak, çizgisel şekilde yapılan ölçümlerde incelenen alan sınırlıdır. Aynı şekilde, indentasyon ölçümlerinde sınırlı bir alan üzerinde çalışılırken bu yöntemin maliyeti de yüksektir. Bu nedenle, bilyalı dövmenin etkisinin derinliğe bağlı değişiminin çok daha geniş bir alanda hem görsel hem de sayısal olarak incelenmesi önemlidir. Bu konuda literatürde oldukça kısıtlı sayıda çalışma bulunmaktadır [4]. Bu çalışmada ilk kez toz metalurjik Ti6Al4V alaşımının mikro-sertlik haritalaması yapılmıştır. Taramalı elektron mikroskobu incelemeleri ile yüzey ve yüzey altı bölgelerdeki morfolojik değişimler incelenmiştir. 3 boyutlu optik profilometre incelemeleriyle bilyalı dövme işleminin numunenin yüzey özelliklerinde meydana getirdiği değişimler araştırılmıştır. Bilyalı dövme işleminin Ti6Al4V alaşımının yüzey ve yüzey altı sertlik değerinde artış meydana getirerek özellikle aşınma ve yorulma dayanımı istenilen uygulamalarda kullanımının sağlanabileceği düşünülmektedir.

## II. MATERYAL VE YÖNTEM

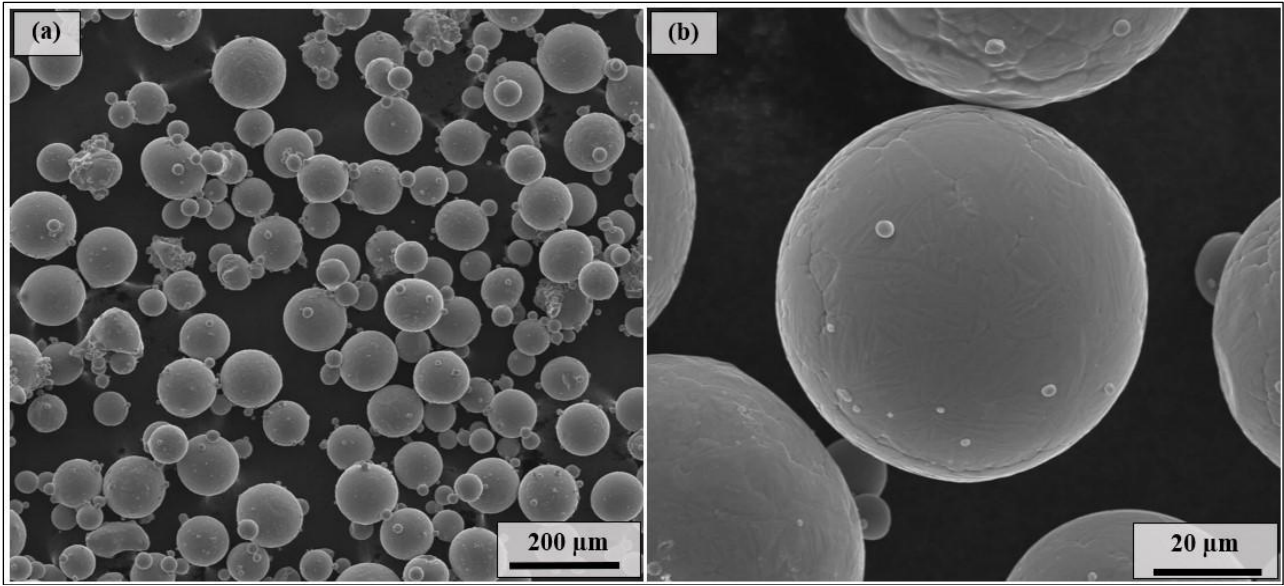
Çalışmada kullanılan malzemeler ve uygulanan yöntemler Şekil 1’de akış şeması olarak verilmiştir.



Ti6Al4V numuneler toz metalürji yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Ardından, numunelerin yüzeylerine bilyalı dövme işlemi uygulanmıştır. Bilyalı dövmenin numunelerin yüzey ve yüzey altı mekanik özellikleri üzerindeki etkisinin incelenmesi amacıyla belirlenen alan içerisinde sertlik taraması gerçekleştirilmiş ve özel geliştirilmiş bir kod yardımıyla Matlab® programı kullanılarak 2 boyutlu sertlik haritaları elde edilmiştir. Sonrasında, dövülmüş numunelerin yüzey topografyaları ve yüzey morfolojileri sırasıyla optik profilometre ve taramalı elektron mikroskobu yardımıyla incelenmiştir. Numunelerin mikroyapısal karakterizasyonunda optik mikroskop kullanılmıştır.

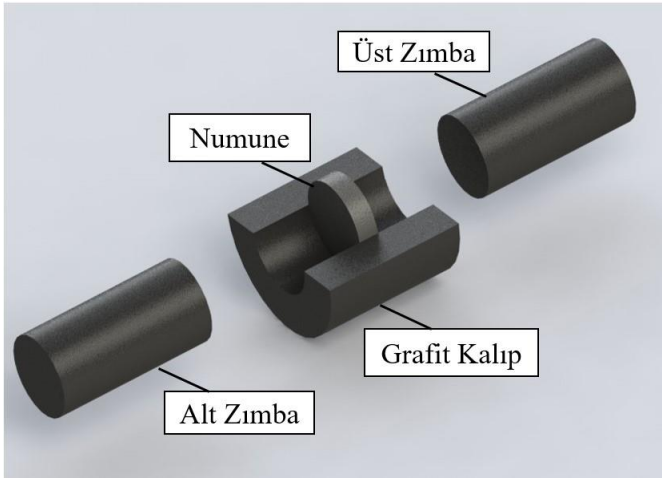
### A. Toz metalürjik Ti6Al4V alaşımının üretimi

Ana numunelerin üretiminde kullanılacak, boyutları 20 µm – 70 µm arasında değişen küresel Ti6Al4V tozları Nanografi Nano Teknoloji A.Ş.’den temin edilmiştir. Şekil 2’de temin edilen tozların SEM fotoğrafları verilmiştir. Kullanılan tozların kimyasal bileşimi enerji dağılımlı X-ışınları spektroskopisi (EDS) ile belirlenmiştir. Analiz sonucuna göre Ti6Al4V tozlarının yapısında ağırlıkça %89,313 titanyum, %7,746 alüminyum ve %2,941 vanadyum elementleri bulunduğu tespit edilmiştir. Toz metalürjik Ti6Al4V numunelerin üretimi sıcak pres cihazında (DIEX, Kore Cumhuriyeti) gerçekleştirilmiştir. Şekil 3’de sıcak preste numunelerin üretimi için kullanılan grafit kalıp bileşenleri ve düzeni verilmiştir. Numuneler 950°C sıcaklıkta 30 dk sinterleme ve 10’ar dakika ısınma ve soğuma süreleriyle 45 MPa basınç altında sinterlenmiştir. Sinterlenen numunelerin Arşimet



Şekil 2. Küresel Ti6Al4V tozlarının SEM görüntüleri (a) 100x ve (b) 1000x büyütme

yoğunluğu %99'un üzerinde ölçülmüştür. Sonuç olarak 4 mm yüksekliğinde 20 mm çapında silindirik numuneler elde edilmiştir. Üretim esnasında oksitlenmeyi en aza indirmek için sinterleme işlemi vakum ortamında ( $10^{-4}$  bar) yapılmıştır.



Şekil 3. Sıcak preste numunelerin üretimi için kullanılan grafit kalıp bileşenleri

### B. Bilyalı dövme işlemi

Toz metalürjik Ti6Al4V numunelerin bilyalı dövme işlemi özel olarak tasarlanmış otomatik kontrollü bilyalı dövme sistemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bilyalı dövme işleminde Şekil 4'te SEM görüntüleri verilen boyutları 600 µm ile 1.000 µm arasında değişen paslanmaz çelik bilyalar kullanılmıştır. Bilyaların yapısındaki elementlerin konsantrasyonlarının belirlenmesi amacıyla EDS analizi gerçekleştirilmiştir. Analiz sonucunda

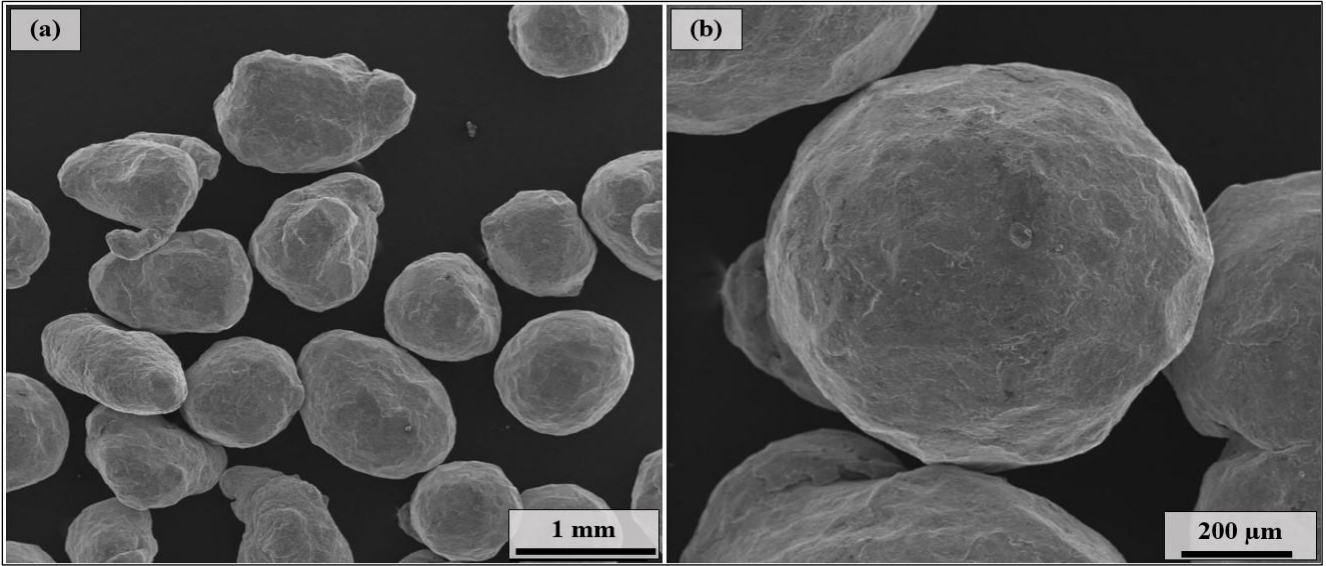
bilyaların yapısında ağırlıkça %53,3 demir, %17,9 krom, %6,35 silisyum, %5,75 nikel ve %4,83 mangan bulunduğu belirlenmiştir. Bilyalar 7 bar basınçla 10 dakika süreyle malzeme yüzeyine püskürtülmüştür. Bilyalar numuneye dik açıyla 40 mm mesafeden gönderilmiştir. İşlem sonrasında yüzeye saplanan bilyaların uzaklaştırılması amacıyla ultrasonik banyo kullanılmıştır.

### C. Mikroyapısal İncelemeler

Bilyalı dövme sonrası toz metalürjik Ti6Al4V alaşımının iç yapısında meydana gelen değişimler taramalı elektron mikroskobu (JEOL JSM-6060 (Japonya)) ile incelenmiştir. İncelemeler, yüzey ve enine kesit görüntüleri üzerinden yapılmıştır. Enine kesit incelemeleri için numuneler öncelikle kesilmiş ve sonrasında sıcak olarak kalıplanmıştır. Yüzeyde kesme esnasında oluşan izler metalografik olarak sırasıyla 320-600-1000-2500 grid kum zımparalar kullanılarak giderilmiştir. Parlatma işlemi sırasıyla 3 ve 0,3 µm alümina süspansiyonları kullanılarak yapılmıştır. Metalografik hazırlama işlemi esnasında yüzeyde oluşan kirlilikler aseton kullanılan ultrasonik banyoda 15 dk temizleme süresi uygulanarak temizlenmiştir. Parlatma sonrasında dağlama işlemi Kroll çözeltisi (2 mL HF, 6 mL HNO<sub>3</sub>, 92 mL H<sub>2</sub>O) kullanılarak yapılmıştır. Numunenin kimyasal kompozisyonu SEM-EDX ile belirlenmiştir.

### D. Mikrosertlik haritalama işlemi

Bilyalı dövme sonrası numunelerin sertlik değerlerindeki değişimin incelenmesi amacıyla bir dizi mikrosertlik testi uygulanmış ve elde edilen



Şekil 4. Bilyalı dövme işleminde kullanılan bilyaların SEM görüntüsü

değerler ile 2 boyutlu sertlik haritaları elde edilmiştir. Sertlik ölçümleri  $900 \times 540 \mu\text{m}^2$  dikdörtgen bir alan taranarak gerçekleştirilmiştir. Sertlik testleri için ASTM E348-17 standardına göre yüzeyden 30  $\mu\text{m}$  mesafeden başlayarak, 100  $\mu\text{m}$  adım boyuyla yaklaşık 200 ölçüm alınmıştır.

İşlem esnasında 0,2 kg yük ve 10 saniye temas süresi parametreleri uygulanmıştır. Elde edilen sertlik değerleri özel geliştirilmiş bir kod ile Matlab® programı yardımıyla işlenerek sertlik haritaları elde edilmiştir [15], [16].

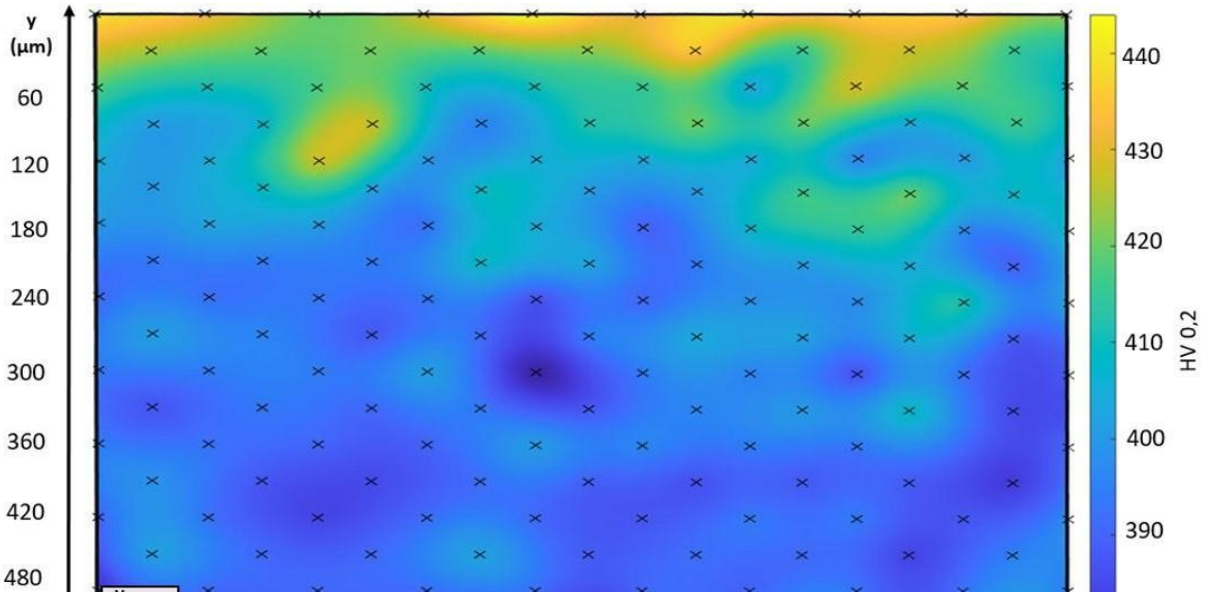
#### E. Yüzey morfolojisi ve topografyası

Numune yüzeylerinin pürüzlülük değerleri, 3 boyutlu optik profilometre (Huvitz, Kore

Cumhuriyeti) kullanılarak incelenmiştir. Ardından, yüzey topografyaları Mountains 9® yazılımı (Digital Surf, Fransa) ile oluşturulmuştur.

#### III. BULGULAR VE TARTIŞMA

Şekil 5'te bilyalı dövülmüş Ti6Al4V alaşımının sertlik taraması sonrası yüzey altı bölgeden elde edilen sertlik haritası verilmiştir. Ölçme işlemi yüzeyin 30  $\mu\text{m}$  altından başlayarak 540  $\mu\text{m}$  derinliğe kadar devam etmiştir. Tarama alanının genişliği ise 950  $\mu\text{m}$  olarak belirlenmiştir. En yüksek sertlik değeri 445 HV<sub>0,2</sub> olarak yüzeyden yaklaşık 30  $\mu\text{m}$  uzaklıkta gözlenmiştir. 180  $\mu\text{m}$  derinliğe kadar malzemenin sertlik değerlerinde artış gözlemlenmeye devam edilirken, bu mesafeden



Şekil 5. Bilyalı dövülen numunenin kesit mikroyapısında derinliğe bağlı sertlik haritası: "x" işaretleri sertlik ölçümü yapılan noktaları göstermektedir (toplam 200 adet).

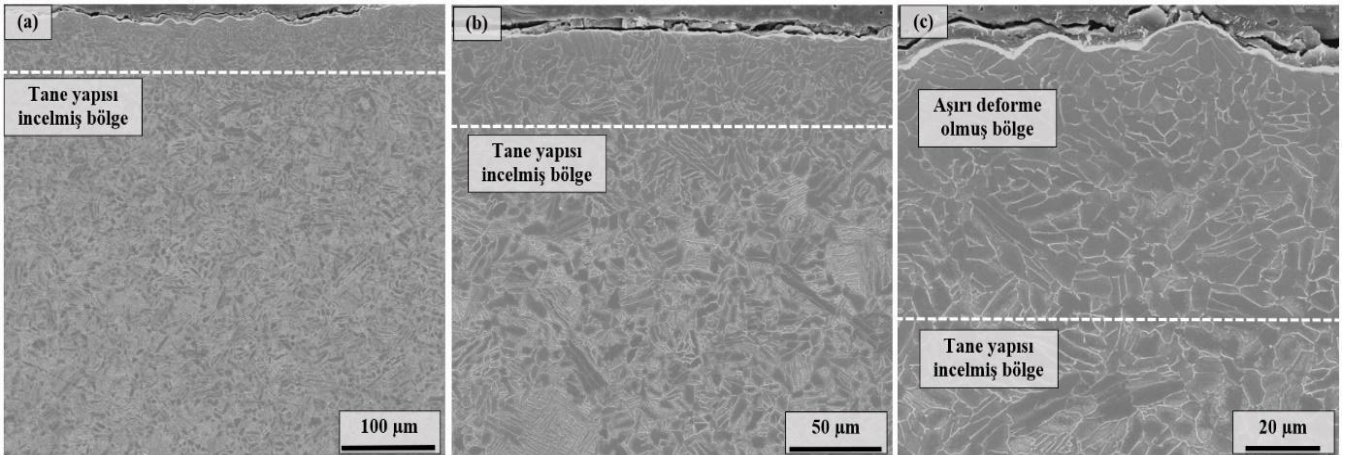
sonra sertlik değerlerinin işlem görmemiş numunenin sertlik değerlerine düştüğü görülmektedir. Numunelerde görülen bu sertlik artışının bilyalı dövme esnasında yüzeye çarpan bilyaların yüzey altı bölgede sebep olduğu tane incelmesi kaynaklı olduğu söylenebilir. Yüzey altı bölgede gerçekleşen tane incelmesi, dislokasyon hareketlerini engelleyerek malzemede gerinim sertleşmesine (Hall-Petch mekanizması) yol açmıştır [13], [17], [18], [19], [20]. Sertlik artışının sebepleri sonraki bölümde detaylı olarak irdelenecektir.

şekil 6 (a-c)'de bilyalı dövülmüş Ti6Al4V alaşımının farklı büyütmelerde yüzey altı mikroyapı SEM görüntüleri verilmiştir. Görüntülere göre yüzeye yakın bölgelerde bilyalı dövme etkisiyle tane incelmesi gerçekleştiği görülmektedir. Yüzey altı bölgedeki tane incelmesinin yaklaşık olarak 200  $\mu\text{m}$  derinliğe kadar devam ettiği gözlemlenmiştir. Tane boyutunun en düşük olduğu bölgeler sertlik

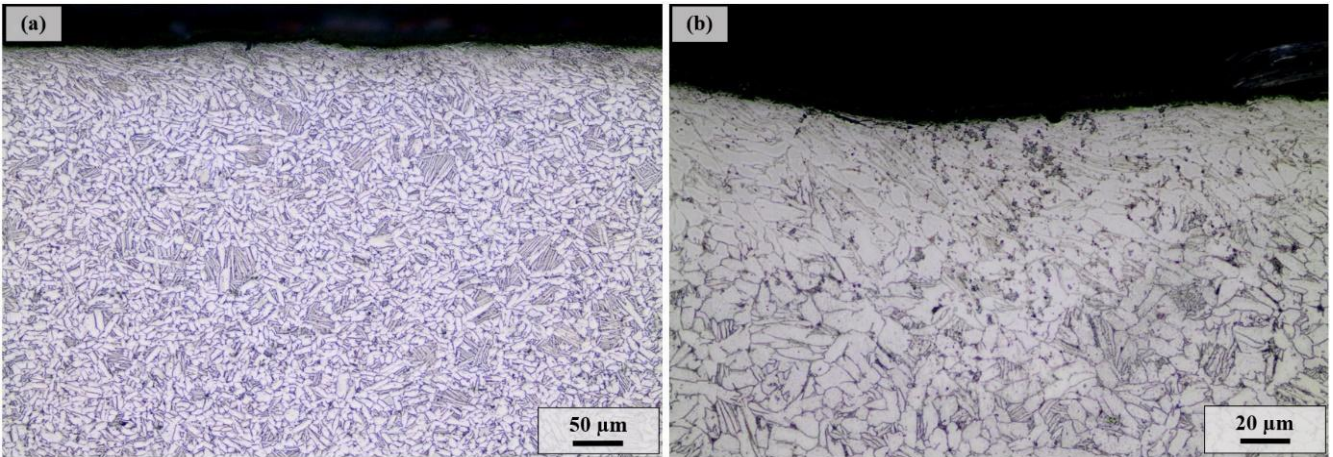
haritasında en yüksek sertlik ollen bölgeler olup, sonuçlar birbiri ile uyumludur. şekil 7'de numuneye ait optik mikroskop görüntüsü verilmiştir. SEM görüntüleri ile uyumlu bir şekilde plastik deformasyon ve buna bağlı tane incelmesi net bir şekilde görülmektedir (şekil 6 a-c). Bilyalı dövme işlemi malzeme yüzeyinde derinliği 10  $\mu\text{m}$ 'a kadar ulaşan çukurlara sebep olmuştur.

Yüzeyde oluşan tepe ve çukurlar malzeme pürüzlülüğünün artmasına da sebebiyet vermiştir. Numunenin yüzeyinin pürüzlülüğünün artmasına rağmen numune yüzeyinde çatlak oluşmaması bilyalı dövme işleminin hasarsız şekilde yapıldığını göstermektedir.

şekil 8-(a)'da bilyalı dövmenin sebep olduğu plastik deformasyonun yüzey topografyasına etkisinin 3 boyutlu topografya haritası üzerinden incelenmiştir. Yaklaşık olarak  $2 \times 1,5 \text{ mm}^2$  boyutlarında bir alanın taranmasıyla elde edilen



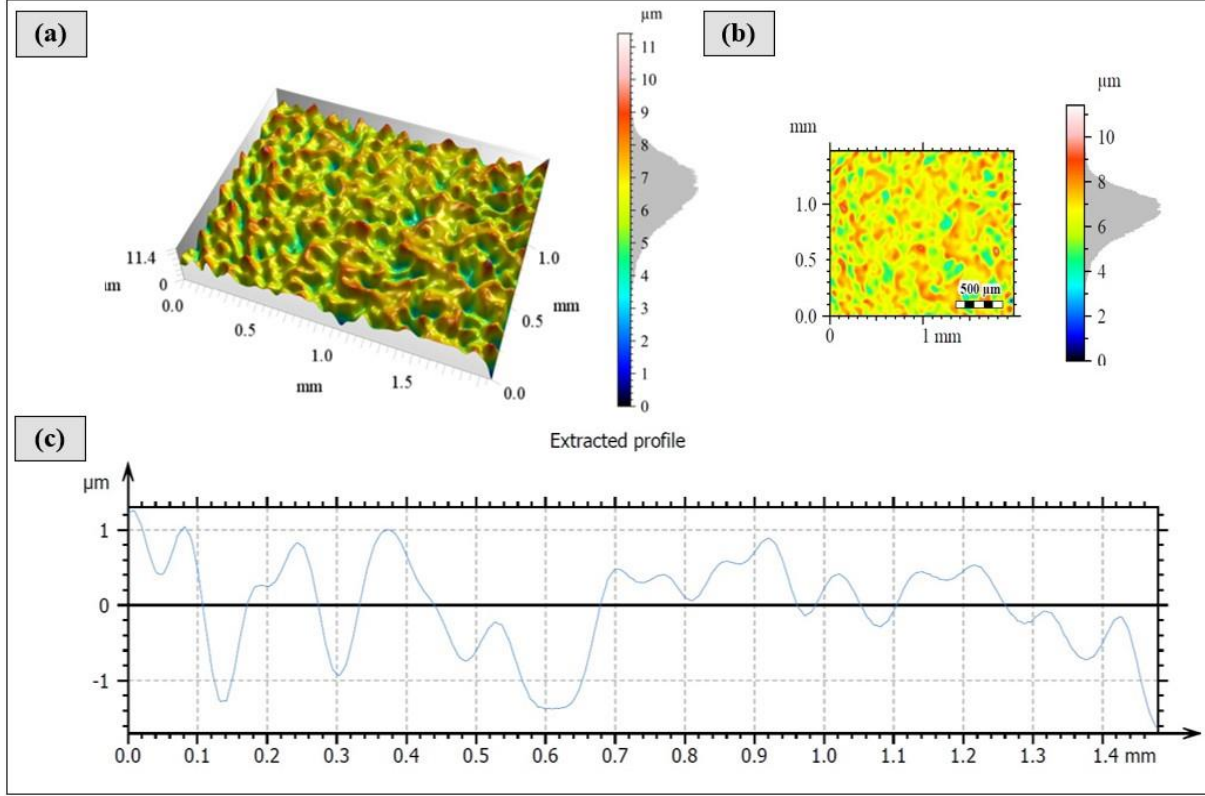
şekil 6. Bilyalı dövülmüş Ti6Al4V numunenin kesitinin SEM görüntüleri: (a) 250x büyütme, (b) 500x büyütme, (c) 1000x büyütme



şekil 7. Bilyalı dövülmüş Ti6Al4V alaşımının farklı büyütmelerde optik mikroskop görüntüleri: (a) düşük büyütmede yüzey ve yüzey altı mikroyapı, (b) yüksek büyütmede yüzey yakın bölgelerde mikroyapı

haritada 11  $\mu\text{m}$  yüksekliğe ulaşan tepeliklerin oluştuğu gözlemlenmiştir. Şekil 8-(b) de ise aynı bölgenin 2 boyutlu yüzey topografya haritası verilmiştir. Haritada görülen ve yükseltileri belirten renkler incelendiğinde alan üzerinde tepe ve çukurların homojen olarak dağıldığı görülmektedir. Bu

değiştirme kabiliyetine yol açmıştır. Bu nedenle bazı bölgelerde bilya çarpması kaynaklı olarak başlayan krater benzeri yapıların oluşumu tamamlanamamış; sıvanma, katlanma ve üst üste binme gibi durumlarla karşılaşmıştır. Şekil 9-(a) ve (b)'de bilya çarpması sonucu malzemede oluşan



Şekil 8. Ti6Al4V numunesinin bilyalı dövme sonrası optik profilometre kullanılarak elde edilmiş a) 3 boyutlu yüzey topografyası, b) 2 boyutlu yüzey topografyası ve c) yüzey profili

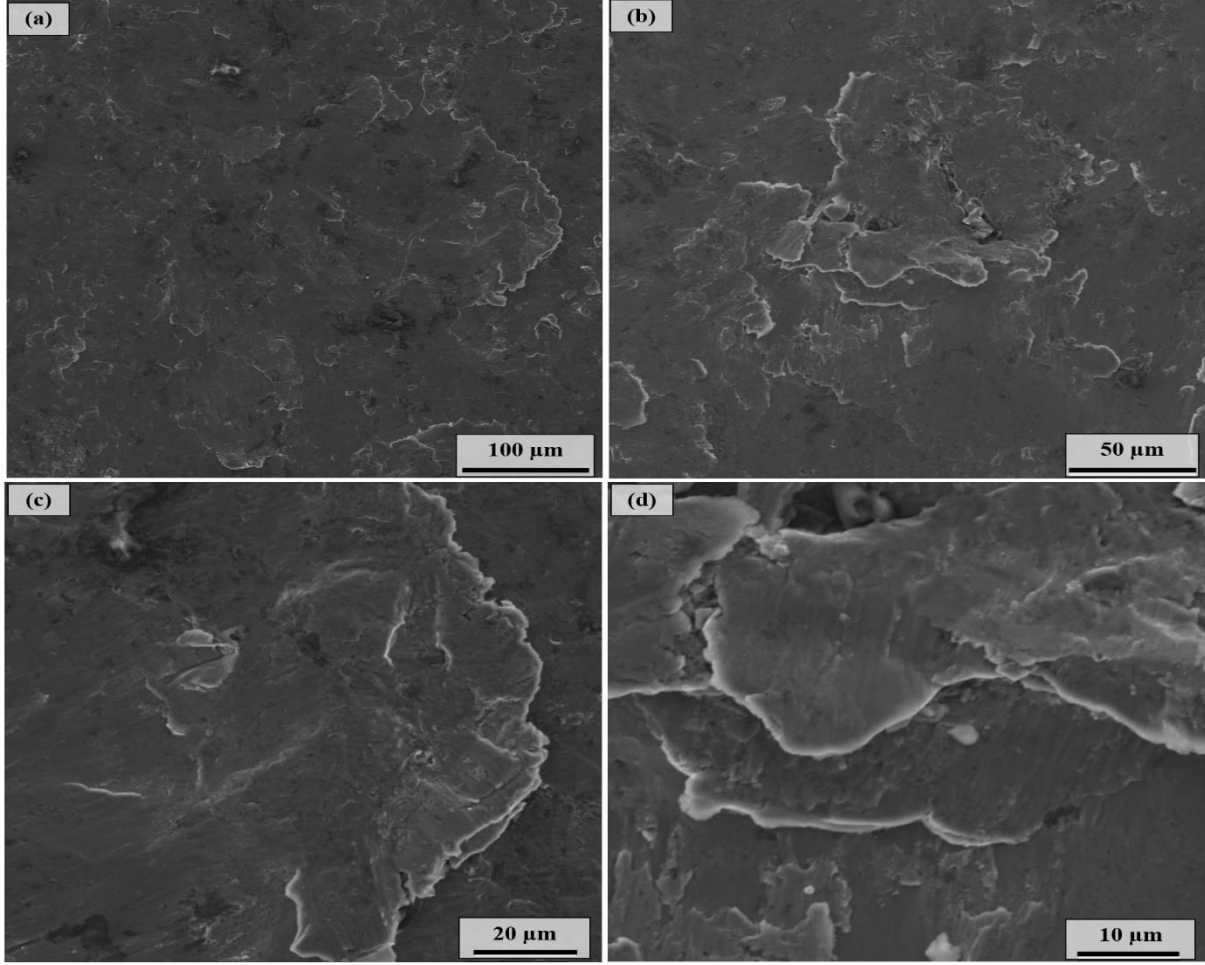
durum, işlemin yapıldığı CNC kontrollü bilyalı dövme cihazının amaçlandığı şekilde çalıştığı ve bilyalı dövmenin işleminin homojen olarak yapıldığını göstermektedir. Şekil 8-(c)'de Şekil 8-(a) ve (b)'deki alanlardan alınmış örneklerin lineer pürüzlülük haritası görülmektedir. Başlangıçta ayna parlaklığına sahip (yaklaşık 0,03  $\mu\text{m}$  yüzey pürüzlülüğü) yüzeyin dövülmesiyle ulaşılan topografyanın lineer haritası, 1,5  $\mu\text{m}$  yükseklikte tepe ve çukurların varlığını ve dövmenin numune yüzeyine etkisini göstermektedir.

Bilyalı dövmenin yüzey morfolojisine olan etkisi ve yüzeyde meydana gelen plastik deformasyonun ayrıntılı olarak irdelenmesi Şekil 9 (a-d)'de verilen yüzey SEM görüntüleri ile yapılmıştır. Şekiller incelendiğinde bilyalı dövme sonucunda malzeme yüzeyinde tepe, çukur ve yer yer krater benzeri yapıların oluştuğu gözlemlenmektedir. Bununla beraber titanyum alaşımlarının sahip oldukları sıkı düzen hekzagonal kafes yapısı, düşük şekil

katlanma net bir şekilde görülebilmektedir. Şekil 9-(c) ve (d)'de ise çarpma etkisiyle malzeme yüzeyindeki üst üste binmiş kısım detaylandırılmıştır.

Literatürde bilyalı dövme sonrası derinliğe bağlı sertlik analizi yaygın olarak kullanılmaktadır. Farklı gruplarca Ti6Al4V [13], [18], [21], Ti6Al7Nb [22], Cp-Ti [23] gibi titanyum alaşımlarına sertliğin değişiminin derinliğe bağlı çizgisel ölçümü gerçekleştirilmiş, bilyalı dövmenin sertlik değerlerini arttırdığı sonucu elde edilmiştir. Yapılan çalışmada ise derinliğe bağlı sertlik değişimi 2 boyutlu haritalar yardımıyla gösterilmiştir. Böylece bilyalı dövmenin, malzemelerin sertlikleri üzerindeki etkisi daha detaylı analiz edilmiş ve homojen bir sertlik artışı sağlandığı gösterilmiştir.

Son olarak, Şekil 6 ve 7'de verilen mikroyapı görüntüleri ve Şekil 8 ve 9'da verilen topografya ve morfolojiler, yüzeye yakın bölgelerde oluşan aşırı plastik deformasyonu açık bir biçimde



Şekil 9. Bilyalı dövme sonrası seçilmiş yüzey morfolojisi detayları

göstermektedir. Yüzeydeki plastik deformasyon ve buna bağlı yüzey altı bölgede oluşan tane incelmeye paralel şekilde malzemelerin sertliğinde yaklaşık olarak 180 µm derinliğe kadar bir artış görülmüştür.

#### IV. SONUÇLAR

Bu çalışmada toz metalürjik Ti6Al4V titanyum alaşımının bilyalı dövme sonrası yüzey ve yüzey altı mekanik ve mikroyapısal özelliklerinin incelenmesi gerçekleştirilmiştir. Malzemelerin kesit bölgelerinden alınan tekrarlı sertlik ölçümlerinin özel geliştirilmiş bir kod ile Matlab® programı kullanılarak 2 boyutlu sertlik haritaları elde edilmiştir. Daha sonrasında SEM, optik mikroskop ve 3 boyutlu yüzey topografyaları kullanılarak numunelerin yüzey ve mikroyapısal özelliklerinin karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- Çalışma sonucunda bilyalı dövülen numunelerin  $540 \times 950 \mu\text{m}^2$  alanına sertlik taraması yapılmış ve 2 boyutlu sertlik değişim haritaları elde

edilmiştir. Sertliğin yüzeyden 180 µm derinliğe kadar arttığı ve sonrasında işlem görmemiş numunelerin sertlik değerlerine düştüğü görülmektedir. En yüksek sertlik değerinin 445 HV<sub>0,2</sub> olarak yüzeye yakın bölgelerde olduğu gözlemlenmiştir.

- Numunelerin kesit mikroyapılarında yüzey ve yüzey altı bölgede aşırı plastik deformasyon ve yüzeyden yaklaşık 200 µm derinliğe kadar olan kısımda tane incelmeye olduğu görülmüştür. Malzemelerin sertlik değerlerindeki artışın ana nedeninin yüzey altı bölgede gerçekleşen tane incelmeye kaynaklı olduğu sonucuna varılmıştır.

- 3 boyutlu yüzey topografyası ve SEM görüntülerinden elde edilen sonuçlarla birlikte bilyalı dövme işleminde yüzeye çarpan bilyaların yüzeyde plastik deformasyona sebep olduğu ve ortalama alansal yüzey pürüzlülüğü değerinin 11 µm'a kadar artırdığı gözlemlenmiştir.

- Bu çalışmada ilk defa kontrollü parametreler altında dövülen biyomedikal Ti6Al4V alaşımının yüzey altı sertlik değerlerinin değişimi 2 boyutlu

haritalar ile görselleştirilmiştir. Detaylı mikroyapısal, morfolojik ve topografik analizler ile sertlik değişiminin paralel olduğu doğrulanmıştır.

Endüstriyel uygulamalarda titanyum alaşımları (özellikle Ti6Al4V) oldukça sık kullanılmaktadır. Ancak bu alaşımların sahip olduğu zayıf yüzey ve yüzey altı özellikler (mekanik özellikler, aşınma dayanımı vb.) nedeniyle kullanımları sınırlanmaktadır. Yapılan çalışma ile titanyum alaşımlarının yüzey ve yüzey altı özelliklerinin etkin bir şekilde geliştirilebileceği ortaya konmuştur. Bu metot, ticari uygulamalarda biyalı dövmenin uygulandığı malzemelerin yüzey ve yüzey altı özelliklerinin geliştirilmesinde kullanılabilir.

## TEŞEKKÜR

Bu çalışma Kocaeli Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiştir. Proje Numarası: FBA-2021-2503.

## KAYNAKLAR

- [1] Amherd Hidalgo, A., et al., Powder Metallurgy Strategies to Improve Properties and Processing of Titanium Alloys: A Review. *Advanced Engineering Materials*, 2017. 19(6).
- [2] Aliyu, A.A.A., et al., Characterization, adhesion strength and in-vitro cytotoxicity investigation of hydroxyapatite coating synthesized on Zr-based BMG by electro discharge process. *Surface and Coatings Technology*, 2019. 370: p. 213-226.
- [3] Sonntag, R., et al., Fatigue strengthening of an orthopedic Ti6Al4V alloy: what is the potential of a final shot peening process? in *Biomaterials and Medical Tribology*. 2013. p. 217-237.
- [4] Avcu, Y.Y., et al., Surface and Tribological Properties of Powder Metallurgical Cp-Ti Titanium Alloy Modified by Shot Peening. *Coatings*, 2023. 13(1).
- [5] Greco, A., et al., Surface Texturing of Tribological Interfaces Using the Vibromechanical Texturing Method. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2009. 131(6).
- [6] Ranjith Kumar, G., G. Rajyalakshmi, and S. Swaroop, A critical appraisal of laser peening and its impact on hydrogen embrittlement of titanium alloys. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2019. 233(13): p. 2371-2398.
- [7] Wu, Z., et al., Tribological properties of dimple-textured titanium alloys under dry sliding contact. *Surface and Coatings Technology*, 2017. 309: p. 21-28.
- [8] Amanov, A., et al., Micro-dimpled surface by ultrasonic nanocrystal surface modification and its tribological effects. *Wear*, 2012. 286-287: p. 136-144.
- [9] Ghosh, S. and S. Abanteriba, Status of surface modification techniques for artificial hip implants. *Sci Technol Adv Mater*, 2016. 17(1): p. 715-735.
- [10] Alikhani Chamgordani, S., R. Miresmaeili, and M. Aliofkhazraei, Improvement in Tribological Behavior of Commercial Pure Titanium (CP-Ti) by Surface Mechanical Attrition Treatment (SMAT). *Tribology International*, 2018. 119: p. 744-752.
- [11] Avcu, E., et al., Tailoring the surface characteristics of electrophoretically deposited chitosan-based bioactive glass composite coatings on titanium implants via grit blasting. *Progress in Organic Coatings*, 2018. 123: p. 362-373.
- [12] Pratap, T. and K. Patra, Mechanical micro-texturing of Ti-6Al-4V surfaces for improved wettability and biotribological performances. *Surface and Coatings Technology*, 2018. 349: p. 71-81.
- [13] Yildiran Avcu, Y., et al., Surface, Subsurface and Tribological Properties of Ti6Al4V Alloy Shot Peened under Different Parameters. *Materials (Basel)*, 2020. 13(19).
- [14] Ganesh, B.K.C., et al., Effect of shotpeening on sliding wear and tensile behavior of titanium implant alloys. *Materials & Design (1980-2015)*, 2014. 56: p. 480-486.
- [15] Brayshaw, W.J., et al., Iterative mesh-based hardness mapping. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2016. 22(5): p. 404-411.
- [16] Iakovakis, E., et al., Wear resistance of an additively manufactured high-carbon martensitic stainless steel. *Sci Rep*, 2022. 12(1): p. 12554.
- [17] Avcu, Y.Y., et al., Modification of Surface and Subsurface Properties of AA1050 Alloy by Shot Peening. *Materials (Basel)*, 2021. 14(21).
- [18] Ongtrakulkij, G., A. Khantachawana, and K. Kondoh, Effects of media parameters on enhance ability of hardness and residual stress of Ti6Al4V by fine shot peening. *Surfaces and Interfaces*, 2020. 18.
- [19] Tevlek, A., et al., Effects of severe plastic deformation on pre-osteoblast cell behavior and proliferation on AISI 304 and Ti-6Al-4V metallic substrates. *Surface and Coatings Technology*, 2019. 366: p. 204-213.
- [20] Xie, L., et al., Characterization on surface mechanical properties of Ti-6Al-4V after shot peening. *Journal of Alloys and Compounds*, 2016. 666: p. 65-70.
- [21] Lim, S.H., et al., In-situ warm shot peening on Ti-6Al-4V alloy: Effects of temperature on fatigue life, residual stress, microstructure and mechanical properties. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021. 882.
- [22] Ongtrakulkij, G. and A. Khantachawana, Influence of Fine Shot Peening on Mechanical Properties of Orthopedic Plate and Screw. *Key Engineering Materials*, 2019. 803: p. 148-152.
- [23] Amanov, A., et al., Fretting Wear and Friction Reduction of CP Titanium and Ti-6Al-4V Alloy by Ultrasonic Nanocrystalline Surface Modification. *Surface and Coatings Technology*, 2012. 207: p. 135-142.