

Orhan Gülcan\* General Electric Aviation  
Gebze / KocaeliSelen Temel Yiğitbaşı Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş.  
AnkaraErhan İlhan Konukseven Orta Doğu Teknik Üniversitesi  
Makine Mühendisliği Bölümü  
Ankara**Makale Bilgisi:**

Araştırma Makalesi

Gönderilme: 05-09-2020

Kabul: 26-09-2020

\*Sorumlu Yazar: Orhan Gülcan  
Email: ogulcan1981@gmail.com

# Elektron Işınıyla Ergitme Yöntemiyle Üretilen Ti6Al4V Parçalarının Mekanik Özellikleri Üzerinde İnşa Yönünün Etkisi

*Bu çalışmanın amacı Ti6Al4V alaşım tozları kullanarak elektron ışınıyla ergitme yöntemiyle üretilen parçaların mekanik özellikleri üzerinde inşa yönünün etkisini araştırmaktır. Üç ekseninde (x, y ve z) numuneler üretilmiş ve yüzey pürüzlülüğünün mekanik özellikler üzerindeki etkisini görebilmek için her bir yöndeki bir numune tormalanmıştır. ASTM E8 standardına göre her bir yönde yapılan çekme testi sonuçlarına göre, z yönünde üretilen numunelerin akma ve çekme dayanımları, x ve y yönlerinde üretilenlere göre daha yüksek çıkmıştır. Her bir yönde üretilen numunelerin akma ve çekme dayanımları, dövme ya da döküm Ti6Al4V parçaların aynı özelliklerinden yüksek çıkmıştır. Numuneler sünek-kırılğan karışımı bir yapı göstermiş, mikroyapı genel olarak Widmanstätten / sepet örgüsü şeklinde çıkmış ve  $\beta$  taneciklerinin içerisinde  $\alpha$  ince tanecikli mikroyapı görülmüştür.*

*Anahtar Kelimeler: Elektron ışınıyla ergitme, inşa yönü, titanyum, eklemeli imalat*

## GİRİŞ

Düşük yoğunluk, iyi mukavemet ve mükemmel korozyon direnci gibi üstün mekanik özelliklerinden dolayı Titanyum (Ti) ve alaşımları, özellikle Ti6Al4V, havacılıktan diş implantlarına kadar farklı endüstrilerde kullanılmaktadır [1]. Ancak, geleneksel işlemedeki yüksek işleme maliyetleri ve uzun teslimat süreleri nedeniyle, Ti ve Ti alaşımlı parçaların eklemeli imalat (Eİ) ile üretimi üzerine araştırmalar son yıllarda hız kazanmıştır.

Eİ'de parçalar, her bir katmanda besleme stoğunun (toz, tel vb.), lazer ya da elektron ışınıyla ergitilmesi ve sonraki katmanlarda soğutulularak yoğunlaştırılması esasına dayanır [2]. Kalıp kullanmadan net şekilli parçaların üretilebilmesi, düşük ham madde-nihai parça ağırlığı oranı ve geleneksel talaşlı imalatla üretilemeyen çok karmaşık parçaların üretilebilmesine imkan vermesi nedeniyle, Eİ biyomedikal, havacılık, otomotiv ve hızlı prototipleme / kalıplama gibi farklı sektörlerde kullanım alanı bulmaktadır [3].

Elektron ışınıyla ergitme (EIE), metal tozlarını katman katman ergitmek için enerji kaynağı olarak

elektron ışınının kullanıldığı bir Eİ türüdür. Tasarlanan üç boyutlu (3B) model öncelikle CAD ortamında ayrı ayrı katmanlara bölünür ve EIE bu verileri okur. Bir toz katmanı, 3B CAD modeli tarafından tanımlanan tam geometriye ergitildiğinde, inşa platformu alçalır ve başka bir toz katmanı ergiyik katman üzerine serilir. Aynı prosedürü tekrarlayarak, 3B modelin tüm kesitleri, nihai modele kadar katman katman inşa edilebilir [4].

Eİ ile üretilen parçaların mekanik özellikleri birçok işleme parametresine bağlıdır. Parçaların Eİ tezgahında inşa yönü bu parametrelerden birisidir. Thomas ve ark. yatay olarak üretilen parçaların mekanik özelliklerinin dikey olarak üretilen parçalardan farklı olduğunu belirtmiştir [5]. Çekme numunelerinin uzunluğu boyunca üretilen numuneler genel olarak uzunluklarına dik olarak üretilen numunelere göre daha yüksek çekme dayanımı sergilerler [6].

Literatürde, inşa yönünün Eİ yöntemiyle üretilen parçaların mekanik özelliklerine etkisi ile ilgili deneysel çalışmaların sonuçları oldukça farklılık göstermektedir. Guan ve ark. seçmeli lazer ergitme yöntemiyle üretilen 304 paslanmaz çelik parçalarda, yatay yönde üretilen numunelerin, dikey yönde üretilenlere göre daha fazla

dayanım özellikleri ama daha düşük uzama miktarı (kopma sırasında) gösterdiğini belirtmişlerdir [7]. Dikey yönde üretilen numunelerin optimum mukavemet ve süneklik kombinasyonu gösterdiğini belirtmişlerdir. Casati ve ark. seçmeli lazer ergitme yöntemiyle üretilen 316L paslanmaz çelik parçalarda, yatay yönde inşa edilen parçaların azami çekme dayanımları ( $\sigma_u$ ) (684,7 MPa) ve sünekliğinin (% 36,3), dikey yönde üretilenlerin özelliklerine göre (580,7 MPa, % 25,7) daha yüksek çıktığını belirtmiştir. [8]. İnşa yönünün EIE yöntemiyle üretilen Ti6Al4V parçalarının mekanik özellikleri üzerindeki etkilerinin araştırıldığı Hrabec ve Quinn tarafından yapılan başka bir çalışma,  $\sigma_u$  ve akma dayanımı ( $\sigma_y$ ) değerlerinin, inşa yönünden etkilenmediğini (x-y yönündeki numuneler için  $\sigma_u$ : 1017-1030 MPa, z yönündeki numuneler için 1009-1033 MPa, x-y yönündeki numuneler için  $\sigma_y$ : 967-983 MPa, z yönündeki numuneler için 961-984 MPa) ama uzamanın x-y yönünde z yönüne göre %30 fazla olduğunu göstermiştir (x-y yönünde % 12,2, z yönünde % 7,0-9,0) [9].

Kobryn ve Semiatin, inşa yönünün ve ısıtılmanın Eİ ile üretilen Ti6Al4V parçaların mekanik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Isıtılma işlemi görmüş parçaların  $\sigma_y$ ,  $\sigma_u$  ve kırılma anındaki uzama değerlerinin, x ve y yönünde üretilmiş numunelerde, z yönünde üretilen numunelere göre daha yüksek olduğu görülmüştür. y ve z yönlerinde üretilen ısıtılma işlemi görmüş numuneler, x yönünde üretilen ısıtılma işlemi görmüş numunelere göre daha yüksek kırılma tokluğu sergilemiştir. Katmanların dizilimlerine göre çatlak ilerleme yolunun mekanik özellikler üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu yorumu yapılmıştır. Örneğin, y ve z yönlerinde, çatlak ilerleme yolu, katmanlara diktir, ama x yönünde çatlak ilerleme yolu katmanlara paraleldir, dolayısıyla katmanlar arasındaki zayıf bağın, çatlak ilerlemesini arttırabileceği yorumu yapılmıştır [10].

İNŞA yönünün Eİ ile üretilen kafes yapıların mekanik özellikleri üzerindeki etkisi Wauthle ve ark. tarafından incelenmiştir. 45° yönünde üretilen numunenin  $\sigma_u$ ,  $\sigma_y$  ve sertliğinin, yatay yönde üretilen numune ile hemen hemen aynı özelliklere sahip olan dikey yönde üretilen numuneye kıyasla ortalama % 35 daha düşük olduğu sonucuna varmışlardır [11]. Öte yandan, Wycisk ve ark.'nın çalışmasında, inşa plakasına göre 45° ve 90°'de üretilen numunelerin yorulma performanslarında anlamlı bir fark olmadığı belirtilmiştir [12].

Yapılan çalışmaların çoğunda Eİ ile üretilen parçaların daha yüksek  $\sigma_y$  ve  $\sigma_u$  değerleri gösterdiği belirtilmiştir. Ancak Edwards ve ark. ARCAM A1 EIE makinesi ile üretilen Ti6Al4V parçaların dayanım ve uzama özelliklerinin, dövme Ti6Al4V'den daha düşük olduğunu belirtmişlerdir. Çalışmalarında, 5 yatay ve 5 dikey yönlü numune kullanmışlar ve EIE'den sonra hiçbir ısıtılma uygulamamışlardır [13].

Eİ ile üretilen parçaların yüzey pürüzlülüğünün mekanik özellikler üzerindeki etkisi, Formanoir ve ark. tarafından çalışılmıştır. Yazarlar, herhangi bir ilave görmemiş parçaların  $832 \pm 24$  MPa  $\sigma_y$  ve % 3,64  $\pm 1,2$  oranında gerinim gösterdiklerini belirtmişlerdir. Parlatılan parçalar  $1055 \pm 11,5$  MPa  $\sigma_y$  ve % 4,58  $\pm 0,78$  gerinim göstermişlerdir. Parlatılmış numunelerin gözeneklilik nedeniyle daha yüksek gerinim gösterdiği sonucuna varmışlardır. Çalışmalarında, Eİ sonrası ısıtılma işlemi de incelenmiş ve ısıtılma işleminin mekanik özellikler üzerinde çok büyük bir etkisinin olmadığı gösterilmiştir [14].

İNŞA yönüne göre mekanik özelliklerin değişmesi birkaç nedene bağlanabilir. Farklı yönler için farklı soğuma hızları bu nedenlerden biridir. Yatay ve dikey yönde üretilen parçalarda, birbirini izleyen her katman arasında, lazer ya da elektron ışınının geçme süresinin farklı olması farklı soğuma hızları ve dolayısıyla farklı mikro yapıların oluşmasına sebep olur [15].

Bu çalışmada, inşa yönünün mekanik özellikler üzerindeki etkisini görmek için, ASTM E8 standardına göre EIE yöntemiyle üç farklı yönde (x, y ve z) üçer numune üretilmiş ve yüzey pürüzlülüğünün mekanik özellikler üzerindeki etkisini görmek için bir her yöndeki numunelerden bir tanesi torna tezgahı ile işlenmiştir. Numunelerin  $\sigma_y$ ,  $\sigma_u$ , ortalama ve azami yüzey pürüzlülükleri ( $R_a$  ve  $R_z$ ), kırılma anındaki uzama miktarları ve mikroyapıları ölçülmüş ve karşılaştırılmıştır.

## MALZEME VE METOD

Deneylerde 45-100  $\mu$ m tanecik boyutlarına sahip Arcam Ti6Al4V (Grade 5) tozlar kullanılmıştır. Malzemeye ait kimyasal kompozisyon ve mekanik özellikler sırasıyla Tablo 1 ve 2'de gösterilmiştir.

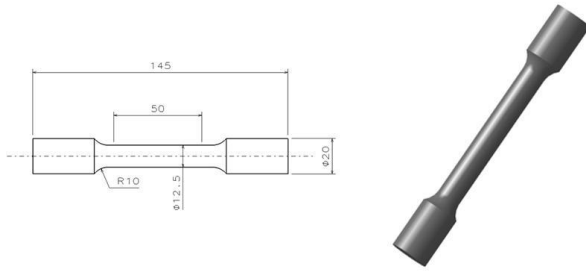
Tablo 1. Arcam Ti6Al4V (Grade 5) tozunun kimyasal kompozisyonu

Malzeme	%
Alüminyum, Al	6
Vanadyum, V	4
Karbon, C	0,03
Demir, Fe	0,1
Oksijen, O	0,15
Nitrojen, N	0,01
Hidrojen, H	0,003
Titanyum, Ti	Denge

Tablo 2. Arcam Ti6Al4V (Grade 5) tozunun mekanik özellikleri

Özellik	Değer
Akma dayanımı	950 MPa
Azami çekme dayanımı	1020 MPa
Uzama	14 %
Alan daralması	40 %
Elastisite modülü	120 GPa

Titanyum alaşım tozlarının İE yöntemiyle üretilmesinde Arcam Q20plus EIE makinası kullanılmıştır. ASTM E8 standardına uygun numuneler (Şekil 1), x, y ve z yönlerinde üretilmiştir (Şekil 2 ve 3). Her numune aynı işleme parametreleri ile aynı anda üretilmiştir. Her bir yönde üçer olmak üzere, toplamda 9 numune üretilmiş ve testlerden sonra ortalama test sonuçları kullanılmıştır.



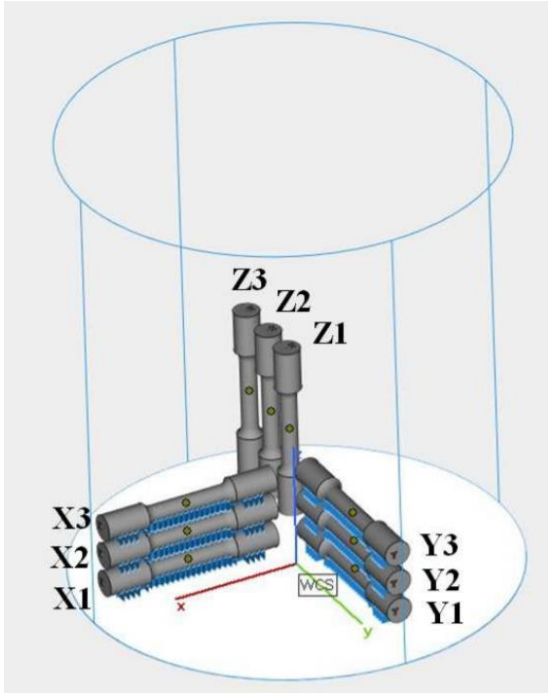
Şekil 1. ASTM E8 standardına uygun çekme test numunesi (ölçüler mm'dir).

için, Instron statik eksenel klipsli ekstensometre (model numarası: 2630-106 & 2630-107) kullanılmıştır (Şekil 4). Numunelerin  $\sigma_y$ ,  $\sigma_u$  ve kırılma anındaki uzama miktarları ölçülmüştür.

Kırılma yüzeylerinin fotoğrafları Nikon SMZ-U mikroskobu ve ZEISS Sigma 300 Taramalı Elektron Mikroskobu ile çekilmiştir.



Şekil 3. EIE yöntemiyle üretilen numuneler



Şekil 2. EIE makinasının işleme odasında numunelerin dizilimi.

Çekme testleri Instron 8803 servo hidrolik test sisteminde yapılmıştır. Daha kesin sonuçlar elde etmek



Şekil 4. Ekstensometreli Instron 8803 test cihazı  
Mikroyapı analizleri için numuneler dairesel kesitleri boyunca kesilmiştir. Sonra, Metkon Ecopress 50

Mounting Press cihazında siyah fenolik tozları kullanılarak bakalite gömülmüşlerdir. Tozların 3 dakikada 190 °C'de ergitilmesi ile 40 mm çapında numuneler elde edilmiştir. Bakalite gömülmüş numuneler, Buehler Beta Grinder-Polisher cihazında Silikon Karbür (SiC) kullanılarak taşlanmış, ardından Alüminyum Oksit (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) solüsyonu kullanılarak parlatılmıştır. Son olarak, Kroll's Reagent solüsyonu kullanılarak dağlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Numunelerin mikroyapıları Leica DM2700 M Optik Mikroskop yardımıyla incelenmiştir.

## TEST SONUÇLARI VE TARTIŞMA

### $\sigma_y$ , $\sigma_u$ ve Kırılma Anındaki Uzama Miktarları

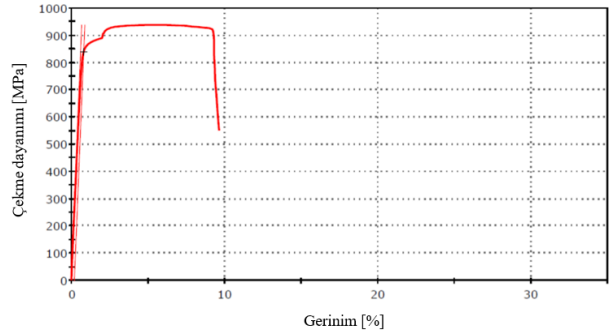
Her bir numune için birer tane gerilim-gerinim grafiği ve yük-uzama grafiği Şekil 5-10 arasında gösterilmiştir. Bütün test sonuçları tablo halinde Tablo 3'te gösterilmiştir.

Tablo 3. Numunelerin çekme test sonuçları

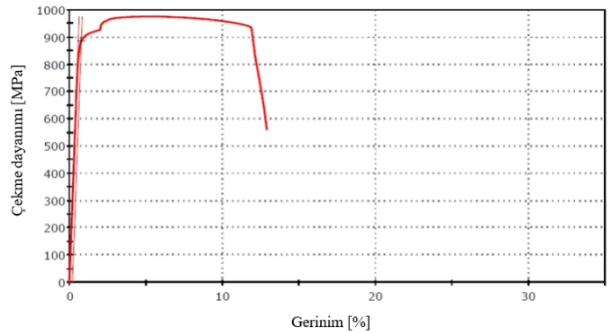
Numune adı	$\sigma_u$ [MPa]	$\sigma_y$ (% 0.2 ofsetli ) [MPa]	E [GPa]	Kırılma anındaki uzama [%]
X1 (tornalanmış )	996,6	868,1	156,9	24
X2	938,0	839,5	138,2	14
X3	976,6	836,7	172,3	15
Y1 (tornalanmış )	992,4	881,7	122,0	19
Y2	975,3	884,6	153,8	15
Y3	1000, 5	909,2	118,9	12
Z1 (tornalanmış )	1023, 7	942,1	152,7	12
Z2	1003, 4	917,0	136,6	12
Z3	1044, 2	963,3	180,0	9

Tablo 3'te gösterildiği gibi, çekme özellikleri inşaa yönünden etkilenmektedir. Sonuçlar, yüzey pürüzlülüğünün, mekanik özellikler üzerinde doğrudan önemli bir etkiye sahip olmadığını göstermektedir. Edwards ve ark.'nın da belirttiği gibi, yüzey pürüzlülüğü, çekme özelliklerinden çok yorulma özellikleri için kritiktir [13]. Dikey yönde (z yönünde) üretilmiş numuneler (Z3), en yüksek  $\sigma_u$  (1044,2 MPa) ve  $\sigma_y$  (963,3 MPa) ve en düşük uzama miktarı (% 9) göstermiştir. Deneysel sonuçlar Al-Bermani ve ark.'nın sonuçlarıyla uyumludur. Al-Bermani ve ark. EIE

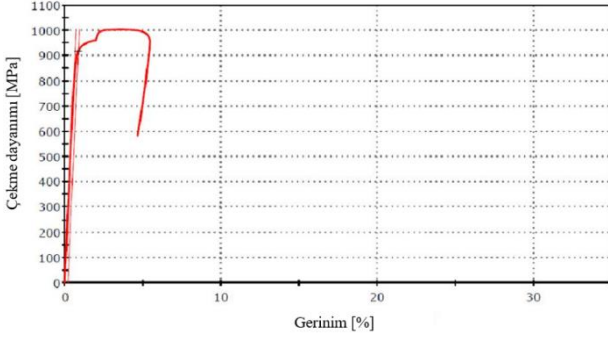
yöntemiyle Ti6Al4V parçalar üretmiş ve 993,9-1031,9 MPa  $\sigma_u$ , 883,7-938,5 MPa  $\sigma_y$  ve % 11,6-13 uzama değerleri elde etmişlerdir [16]. Zhai ve ark. EIE yöndeminde inşaa yönünün mekanik özellikler üzerindeki etkisini incelemiş ve inşaa yönünün x veya y'den z yönüne, yani yataydan dikeye, değişmesi durumunda, çekme yönünün de değiştiğini ve  $\sigma_u$  ve  $\sigma_y$ 'nin arttığını belirtmişlerdir [17]. Hrade ve Quinn'in çalışmasından elde edilen test sonuçları, x ve y yönlerindeki uzamanın z yönüne göre daha yüksek olduğu sonucunu desteklemektedir [9]. Farklı inşaa yönlerindeki farklı dayanım özellikleri, parçaların anizotropisine bağlanabilir. Guan ve ark.'nın da belirttiği gibi, Eİ ile farklı yönlerde üretilen parçaların çekme özellikleri birbirini takip eden iki katman arasındaki metalurjik bağa bağlıdır. Çekme yüküne paralel ya da dikey olarak dizilen katmanlar, mikroyapıdaki taneciklerin uzamasını etkiler, bu da mekanik özelliklerin değişimine sebep olur [7]. Farklı inşaa yönlerinde, parça içerisindeki gözenekler, yüklemeye yönüne yatay ya da dikey olarak konumlanabilir. Bu, parçada meydana gelebilecek muhtemel bir çatlağın ilerlemesini hızlandırabileceği gibi yavaşlatabilir de, dolayısıyla çekme özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Ayrıca farklı inşaa yönlerinde farklı sıcaklık değişimleri de farklı gözeneklilik miktarlarına ve kalıntı gerilmelere sebep olabilir [6].



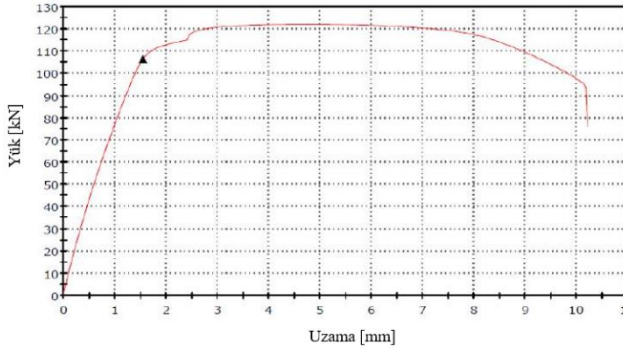
Şekil 5. X2 numunesi için gerinim-çekme dayanımı grafiği



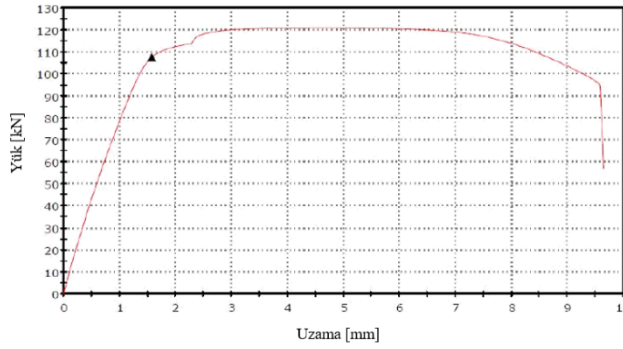
Şekil 6. Y2 numunesi için gerinim-çekme dayanımı grafiği



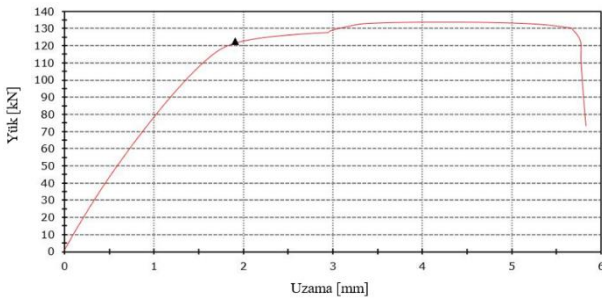
Şekil 7. Z2 numunesi için gerinim-çekme dayanımı grafiği



Şekil 8. X1 numunesi için uzama-yük grafiği



Şekil 9. Y1 numunesi için uzama-yük grafiği



Şekil 10. Z1 numunesi için uzama-yük grafiği

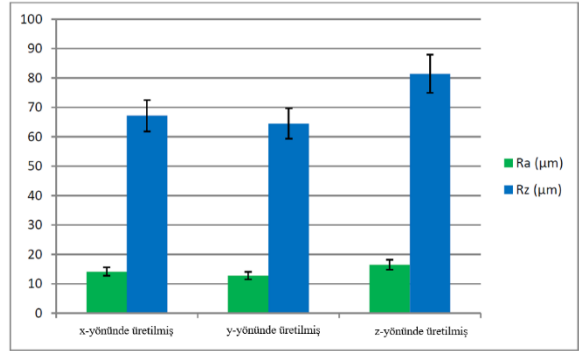
Tablo 3, genel olarak, EIE yöntemiyle üretilmiş numunelerin, döküm parçadan ( $\sigma_u = 860$  MPa,  $\sigma_y = 758$  MPa,  $E = 114$  GPa, uzama  $\Rightarrow$  % 8) veya dövme parçadan ( $\sigma_u = 930$  MPa,  $\sigma_y = 860$  MPa,  $E = 114$  GPa, uzama  $\Rightarrow$  %

10)) daha yüksek  $\sigma_u$ ,  $\sigma_y$ ,  $E$  ve uzama gösterdiğini göstermektedir.

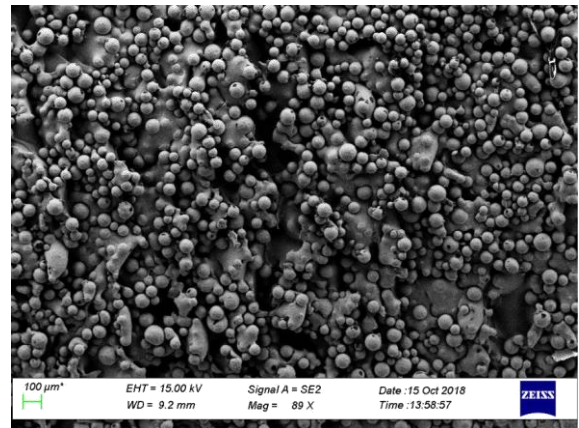
#### R<sub>a</sub> ve R<sub>z</sub> Sonuçları

Şekil 11 R<sub>a</sub> ve R<sub>z</sub> sonuçlarını, Şekil 12 ise numunelerin yüzeylerinin taramalı elektron mikroskobu görüntülerini göstermektedir. Her bir katmandaki tozları ergitmek için kullanılan ışının farklılığından dolayı, "plaka yığını" şeklinde [18] dizilimler yüksek yüzey pürüzlülüğünün bir sebebidir. Diğer sebebi ise, bazı tozların tam ergimeden parça yüzeyine yapışmasıdır (Şekil 12).

Yüzey pürüzlülükleri ve mekanik özellikler karşılaştırıldığında, Tablo 3 ve Şekil 11'den de anlaşılacağı gibi uzamanın yüzey pürüzlülüğü ile ilintili olduğu görülmektedir. En düşük uzama miktarı, yüzey pürüzlülüğünün en yüksek olduğu z yönünde üretilmiş numunelerde görülmüştür. Yüzey pürüzlülüğü arttıkça, uzamanın azaldığı görülmüştür. Karlsson ve ark. uzama miktarlarındaki farkları, fraktografi analizleri sonucunda, numune içerisinde farklı yerlerde görülen gözeneklere bağlamıştır. Düşük uzama miktarına sahip numunelerde, gözenekler hem yüzeyde hem de numune içerisinde görülmüşken, yüksek uzama miktarına sahip numunelerde, gözenekler daha çok numune içerisinde gözlemlenmiştir [19].



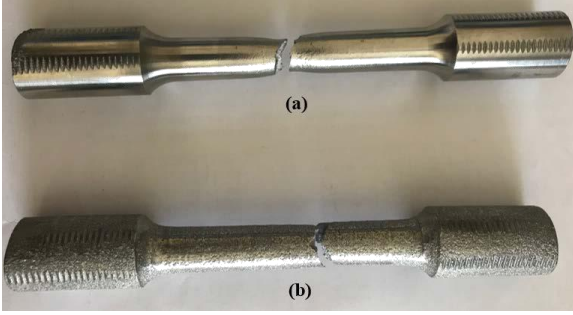
Şekil 11. R<sub>a</sub> ve R<sub>z</sub> sonuçları



Şekil 12. Z2 numunesinin yanal yüzeyinin taramalı elektron mikroskop görüntüsü

## Kırılmış Yüzey Analizi

Şekil 13'te EİE ile üretilmiş ve herhangi bir ilave işlem görmemiş ve tornalanmış numunelerin fotoğrafları ve Şekil 14'te ise her üç yönde üretilen numunelerin kırık yüzeylerinin mikroskop görüntüleri gösterilmiştir. Şekil 13'ten görülebileceği gibi tornalanmış parçalarda boyun bölgesi oluşmuşken, herhangi bir ilave işlem görmemiş parçalar kayma kırılması özelliği göstermiştir. Şekil 14'ten görülebileceği gibi kırık yüzeyler tipik olarak tepe-çukur görüntüsüne sahiptir [20]. Şekil 13'ten anlaşıldığı gibi, kırık yüzeyler yükleme yönüne göre 45° açı yapmaktadır.

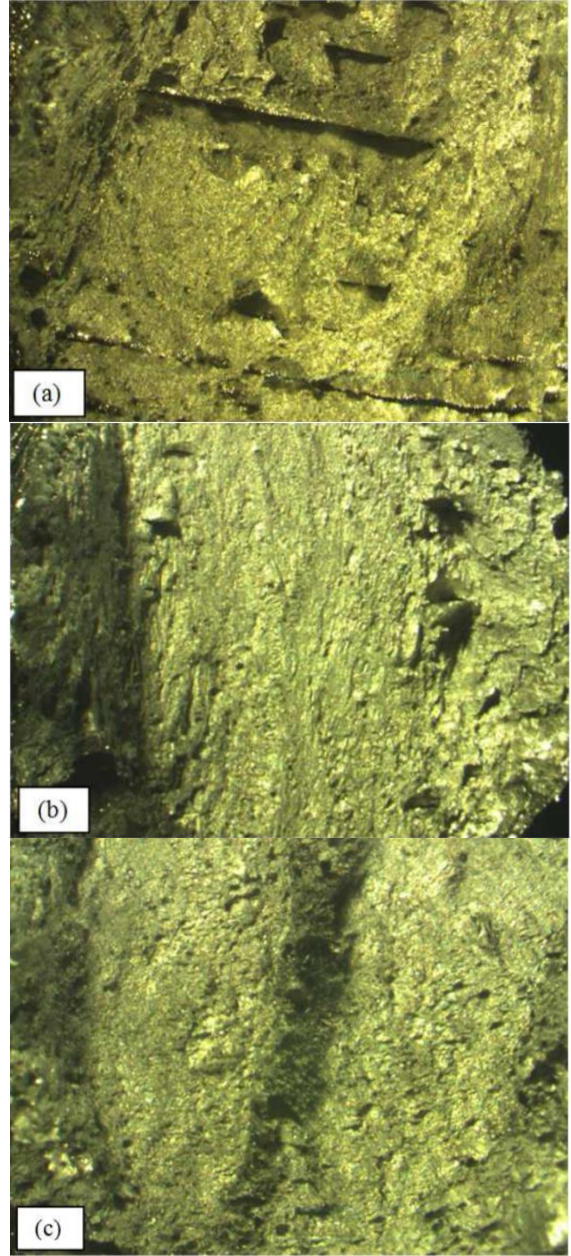


Şekil 13. (a) tornalanmış numunenin ve (b) herhangi bir ilave işlem görmemiş numunenin çekme testi sonucu görselleri

Shunmugavela ve ark. yaptıkları çalışmada Eİ yöntemiyle üretilen Ti6Al4V parçaları ile dövme parçaların mikroyapı ve mekanik özelliklerini karşılaştırmışlardır. Taramalı elektron mikroskobu kullanarak, kırılmış yüzeyleri incelemişler ve Eİ ile üretilen parçalarda, gevrek karakteristiğinin göstergesi olan küçük boyutlu çukurların görüldüğünü, dövme parçalarda ise sünek karakteristiğinin göstergesi olan derin çukurların görüldüğünü belirtmişlerdir [21]. Quénard ve ark. Eİ yöntemiyle üretilen Ti6Al4V parçaların çekme testi sonucunda oluşan kırık yüzeylerini incelemişler ve kırılma mekanizmasının daha çok sünek olduğunu belirtmişlerdir. Aynı zamanda, mikro çatlaklarla beraber gevrek yüzeylerin görüldüğünün belirtildiği çalışmada, bu gevrek yüzeyleri, iki sünek yüzeyi birleştiren katmanlardaki bölünmeye bağlamışlar ve her ne kadar kırık yüzeyde hem sünek hem de gevrek mekanizmalar görülmüşse de sünek mekanizmanın daha yoğun olduğunu belirtmişlerdir [22].

Bu çalışmada numuneler, Şekil 15'ten görülebileceği gibi hem sünek hem de gevrek karakteristik göstermişlerdir. Daha çok derin çukurlar görünmesine rağmen bu çukurların arasında kırık yüzeyler de görünmektedir. Z yönünde üretilmiş parçalarda, diğer yönlerde üretilmiş numunelere göre daha fazla gevrek yüzey görülmüştür. En yüksek uzama miktarına sahip x yönünde üretilmiş ve tornalanmış numunenin kırık yüzeyi incelendiğinde, sünek yüzeylerle karşılaştırıldığında gevrek yüzeylerin çok az olduğu

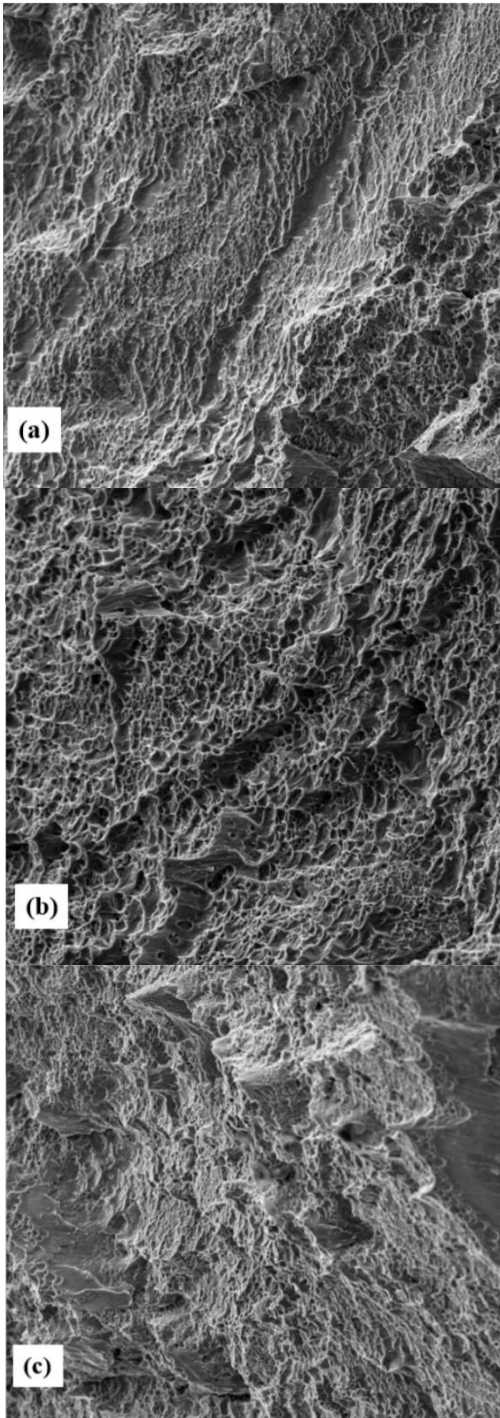
görülmüştür (Şekil 16). Dolayısıyla taramalı elektron mikroskop görüntülerinin, numunelerin çekme testi sonuçları ve uzama miktarları ile uyumlu olduğu görülmüştür. Gevrek yüzey miktarının parçanın sünekliğini etkilediği ve uzama miktarları üzerinde önemli etkiye sahip olduğu sonucuna varılabilir.



Şekil 14. (a) X2 (b) Y2 ve (c) Z2 numunelerinin kırık yüzeylerinin mikroskop görüntüleri

## Mikroyapı Analizi

Ti6Al4V, altıgen kapalı paketlenmiş kristal yapıya sahip  $\alpha$  fazı ve hacim merkezli kübik kafes yapısına sahip  $\beta$  fazından oluşur. Bu alışımda, Al,  $\alpha$  fazını daha yüksek sıcaklıklarda dengelemek için kullanılırken, V daha düşük sıcaklıklarda  $\beta$  fazını dengelemek için kullanılır [23].



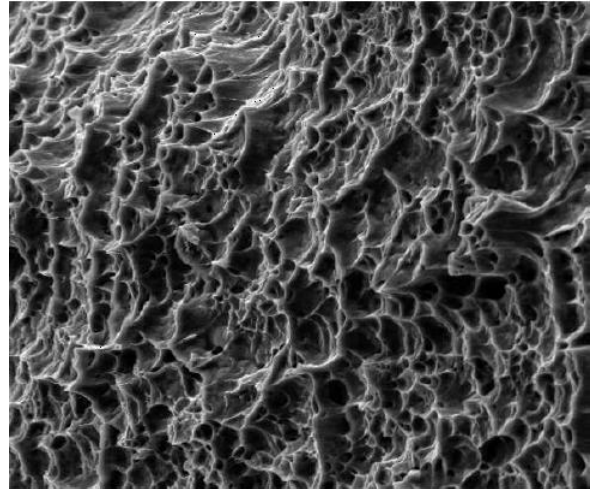
Şekil 15. (a) X2 (b) Y2 ve (c) Z2 numunelerinin kırık yüzeylerinin taramalı elektron mikroskop görüntüleri

Şekil 17-19, numunelerin dairesel kesitinin optik mikroskop görüntülerini göstermektedir. X numunesinin kesiti YZ düzlemini gösterirken Y numunesinin kesiti makinenin XZ düzlemini gösterir. Bu düzlemlerle temsil edilen yapılar, inşa yönüne (yani z eksenine) paraleldir ve  $\beta$  sütun yapıları resimlerden görülebilmektedir. Z yönünde üretilmiş numunenin resminde, XY düzlemi ve

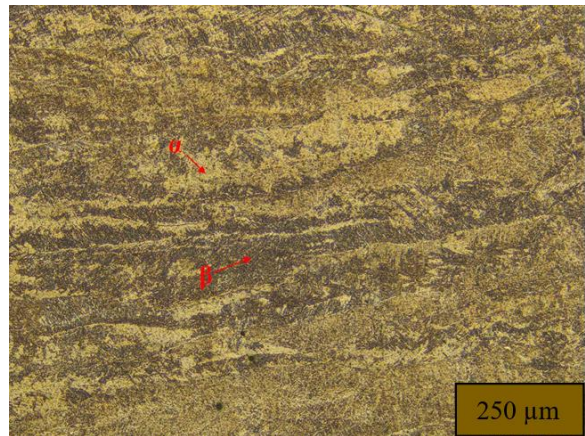
inşa yönüne dik yapı temsil edilmiş ve sütun şeklindeki taneciklerin dik kesitleri görülebilmektedir.

Karanlık alan  $\beta$  fazını temsil ederken,  $\alpha$  fazı resimlerde aydınlık alan ile temsil edilir. Numunelerin mikroyapıları homojen değildir. Z yönünde üretilmiş numunelerde sepet örgüsü / Widmanstätten ve  $\alpha + \beta$  ince tabakalı yapı görülmüştür ve tane boyutunun farklı noktalarda değiştiği gözlenmiştir. X ve Y yönlerinde üretilen numunelerin kesitlerinde, mikroyapı esas olarak sepet örgüsü / Widmanstätten'dır ve önceki  $\beta$  taneciklerinin içinde  $\alpha + \beta$  ince tabakalı mikroyapı gözlemlenirken,  $\alpha$  ve  $\beta$  tabakalarının boyutları farklı yerlerde değişiklik göstermiştir [13, 17, 24, 25].

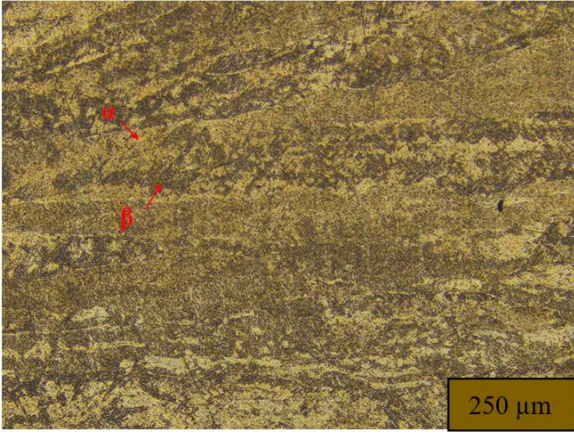
Çalışmamızda z numuneleri için daha düşük uzama oranları gözlemlenmiştir. Bunun nedeni, çekme testi ile uygulanan yüke paralel olan sütun şeklindeki tanecik yapılar olabilir. Z numunelerinin daha yüksek çekme dayanımları ile tanecik yönü arasında benzer bir ilişki de kurulabilir [26].



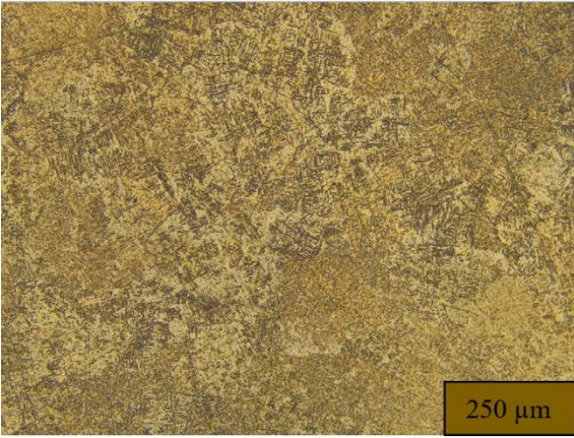
Şekil 16. Tormalanmış x yönünde üretilmiş numunenin kırık yüzeyinin taramalı elektron mikroskop görüntüsü



Şekil 17. X2 numunesinin mikroyapısı



Şekil 18. Y2 numunesinin mikroyapısı



Şekil 19. Z2 numunesinin mikroyapısı

## SONUÇ

Bu çalışmada EIE yöntemiyle üretilen Ti6Al4V parçalarının mekanik özellikleri üzerinde inşa yönünün etkisi incelenmiştir. Çalışmada aşağıdaki genel çıkarımlar yapılmıştır;

- Eİ'nin doğası gereği, dövme ya da döküm parçalara göre daha yüksek yüzey pürüzlülük değerleri elde edilmiştir.
- Numunelerin torna ile işlenerek yüzey pürüzlülüklerinin azaltılmasının mekanik özellikler üzerinde direkt bir etkisinin olmadığı görülmüştür ama yüzey pürüzlülüğü azaldıkça uzama miktarları artmıştır.
- Dövme ya da döküm parçalarla karşılaştırıldığında, EIE yöntemiyle üretilen Ti6Al4V parçalar daha yüksek çekme özellikleri ( $\sigma_u$ ,  $\sigma_y$ , E ve uzama) göstermiştir.
- Z yönünde üretilmiş numuneler en yüksek  $\sigma_u$ ,  $\sigma_y$  ve en düşük uzama miktarı göstermiştir.
- Yüzey pürüzlülüğü arttıkça, uzama miktarı azalmıştır.

- Numuneler hem sünek hem de gevrek karakteristik göstermesine rağmen, sünek karakteristiğinin baskın olduğu görülmüştür.
- Mikroyapı daha çok sepet örgüsü / Widmanstatten'dır ve önceki  $\beta$  taneciklerinin içinde  $\alpha + \beta$  ince tabakalı mikroyapı gözlemlenmiştir.

## EFFECT OF BUILDING DIRECTION ON MECHANICAL PROPERTIES OF Ti6Al4V PARTS PRODUCED BY ELECTRON BEAM MELTING

The aim of this study is to investigate the effect of building direction on mechanical properties of the parts fabricated using Ti6Al4V alloy powders by electron beam melting method. Three specimens in three different directions (X, Y and Z) were produced and to see the effect of surface roughness on mechanical properties, one of the samples in each direction were machined by lathe. The results of tension tests on samples produced in three directions according to ASTM E8 standard revealed that yield and tensile strength of the samples built in Z direction are higher than the related properties of the samples built in X and Y directions. Yield and tensile strength of the samples built in each of the direction comes out to be higher than the same properties of the wrought or cast Ti6Al4V parts. Specimens displayed a mixed ductile-brittle fracture characteristic and the microstructure is mainly Widmanstatten / basket weave and  $\alpha$  lamellar microstructure was observed inside the prior  $\beta$  grains.

**Keywords:** Electron Beam, Titanium, Building Direction, Additive Manufacturing

## KAYNAKÇA

1. Banerjee, D., Williams, J. C., "Perspectives on Titanium Science and Technology", Acta Materialia, 61, 2013, 844-879.
2. Herzog, D., Seyda, V., Wycisk, E., Emmelmann, C., "Additive Manufacturing of Metals", Acta Materialia, 117, 2016, 371-392.
3. Yamanaka, K., Saito, W., Mori, M., Matsumoto, H., Chiba, A., "Preparation of Weak-Textured Commercially Pure Titanium by Electron Beam Melting", Additive Manufacturing, 8, 2015, 105-109.
4. Murr, L. E., Esquivel, E. V., Quinones, S. A., Gaytan, S. M., Lopez, M. I., Martinez, E. Y., Medina, F., Hernandez, D. H., Martinez, E., Martinez, J. L., Stafford, S. W., Brown, D. K., Hoppe, T., Meyers, W., Lindhe, U., Wicker, R. B., "Microstructures and Mechanical Properties of Electron Beam-Rapid Manufactured Ti-6Al-4V Biomedical Prototypes Compared to Wrought Ti-6Al-4V", Materials Characterization, 60, 2009, 96-105.



5. Thomas, M., Malot, T., Aubry, P., Colin, C., Vilaro, T., Bertrand, P., "The Prospects for Additive Manufacturing of Bulk TiAl Alloy", *Materials At High Temperatures*, 33, 2016, 571-577.
6. Shamsaei, N., Yadollahi, A., Bian, L., Thompson, S. M., "An Overview of Direct Laser Deposition for Additive Manufacturing; Part II: Mechanical Behavior, Process Parameter Optimization and Control", *Additive Manufacturing*, 8, 2015, 12-35.
7. Guan, K., Wang, Z., Gao, M., Li, X., Zeng, X., "Effects of Processing Parameters on Tensile Properties of Selective Laser Melted 304 Stainless Steel", *Material Design*, 50, 2013, 581-586.
8. Casati, R., Lemke, J., Vedani, M., "Microstructure and Fracture Behavior of 316L Austenitic Stainless Steel Produced by Selective Laser Melting", *Journal of Material Science and Technology*, 32, 2016, 738-744.
9. Hrabe, N., Quinn, T., "Effects of Processing on Microstructure and Mechanical Properties of a Titanium Alloy (Ti-6Al-4V) Fabricated Using Electron Beam Melting (EBM), Part 2: Energy Input, Orientation, and Location", *Material Science and Engineering A*, 573, 2013, 271-277.
10. Kobryn, P., Semiatin, S., "Microstructure and Texture Evolution During Solidification Processing of Ti-6Al-4V", *Journal of Material Processing Technology*, 135, 2013, 330-339.
11. Wauthle, R., Vrancken, B., Beynaerts, B., Jorissen, K., Schrooten, J., Kruth, J., Humbeeck, J. V., "Effects of Build Orientation and Heat Treatment on the Microstructure and Mechanical Properties of Selective Laser Melted Ti6Al4V Lattice Structures", *Additive Manufacturing*, 5, 2015, 77-84.
12. Wycisk, E., Emmelmann, C., Siddique, S., Walther, F., "High Cycle Fatigue (HCF) Performance of Ti-6Al-4V Alloy Processed by Selective Laser Melting", *Advanced Materials Research*, 816, 2013, 134-139.
13. Edwards, P., O'Conner, A., Ramulu, M., "Electron Beam Additive Manufacturing of Titanium Components: Properties and Performance", *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 135, 2013, 1-7.
14. Formanoir, C., Michotte, S., Rigo, O., Germain, L., Godet, S., "Electron Beam Melted Ti-6Al-4V: Microstructure, Texture and Mechanical Behavior of the As-Built and Heat-Treated Material", *Material Science and Engineering A*, 652, 2016, 105-119.
15. Blackwell, P. L., "The Mechanical and Microstructural Characteristics of Laser-Deposited In718", *Journal of Material Processing Technology*, 170, 2015, 240-246.
16. Al-Bermani, S. S., Blackmore, M. L., Zhang, W., Todd, I., "The Origin of Microstructural Diversity, Texture and Mechanical Properties In Electron Beam Melted Ti-6Al-4V", *Metallurgical and Materials Transactions A*, 41, 2010, 3422-3434.
17. Zhai, Y., Galarraga, H., Lados, D. A., "Microstructure Evolution, Tensile Properties, and Fatigue Damage Mechanisms in Ti-6Al-4V Alloys Fabricated by Two Additive Manufacturing Techniques", *Procedia Engineering*, 114, 2015, 658-666.
18. Suard, M., "Characterization and Optimization of Lattice Structures Made by Electron Beam Melting, PhD. Thesis, Universite De Grenoble, France, 2006.
19. Karlsson, J., Sjogren, T., Snis, A., Engqvist, H., Lausmaa, J., "Digital Image Correlation Analysis of Local Strain Fields on Ti6Al4V Manufactured by Electron Beam Melting", *Material Science and Engineering A*, 618, 2014, 456-461.
20. Schulze, C., Weinmann, M., Schweigel, C., Keßler, O., Bader, R., "Mechanical Properties of a Newly Additive Manufactured Implant Material Based on Ti-42Nb", *Materials*, 11, 2018, 1-20.
21. Shunmugavela, M., Polishettya, A., Littlefair, G., "Microstructure and Mechanical Properties of Wrought and Additive Manufactured Ti-6Al-4V Cylindrical Bars", *Procedia Technology*, 20, 2015, 231-236.
22. Quénard, O., Dorival, O., Guy, P. H., Votié, A., Brethome, K., "Measurement of Fracture Toughness of Metallic Materials Produced by Additive Manufacturing", *Ceas Space Journal*, 10, 2018, 343-353.
23. Mills, K., "Metallography and Microstructures", *ASM Handbook 9*, ASM International, Materials Park, OH, USA, 1985.
24. Galarraga, H., Lados, D. A., Dehoff, R. R., Kirka, M. M., Nandwana, P., "Effects of the Microstructure and Porosity on Properties of Ti-6Al-4V ELI Alloy Fabricated by Electron Beam Melting (EBM)", *Additive Manufacturing*, 10, 2016, 47-57.
25. Rafi, H. K., Karthik, N. V., Gong, H., Starr, T. L., Stucker, B. E., "Microstructures and Mechanical Properties of Ti6Al4V Parts Fabricated by Selective Laser Melting and Electron Beam Melting", *Journal of Materials Engineering and Performance*, 22, 2013, 3872-3883.
26. Bass, B. S., "Validating the Arcam EBM Process as an Alternative Fabrication Method for Titanium-6Al-4V Alloys", Ms. Thesis, N. C. State University, USA, 2008.