

**Orhan Gülcan**

Dr.  
Türk Havacılık Ve Uzay Sanayii A.Ş.  
Ankara

**Erhan İlhan Konukseven**

Doç. Dr.  
Orta Doğu Teknik Üniversitesi  
Makina Mühendisliği Bölümü  
Ankara

**Selen Temel**

Mak. Müh.  
Türk Havacılık Ve Uzay Sanayii A.Ş.  
Ankara

# Katmanlı İmalatla Üretilen Ti6Al4V Parçalarının Mekanik Özellikleri

*Bu çalışmada, katmanlı imalat yöntemiyle üretilen Ti alaşım parçalarının mekanik özellikleri ve bu özellikler üzerine etki eden faktörler detaylı bir şekilde incelenmiştir. Yanal kayma mesafesi, tarama hızı ve katman kalınlığı gibi üretim parametrelerinin yanı sıra, üretim yöntemi, üretim sonucu parçada oluşan artık gerilmeler ve ısıl işlem uygulanması gibi faktörlerin de mekanik özellikler üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Literatür taraması sonucu elde edilen bulgulara göre, sonuç bölümünde çalışmaların yetersiz olduğu konular listelenerek ileriki muhtemel uygulamalarından bahsedilmiştir.*

*Anahtar Kelimeler: Katmanlı İmalat, Tarama Hızı, Katman Kalınlığı, Artık Gerilmeler*

## GİRİŞ

### Katmanlı İmalat

Katmanlı imalat, farklı yöntemlere göre değişmekle birlikte genelde toz veya tel ham malzemenin eritilip, bir parçanın katman katman üretilmesinde kullanılması prensibine dayanır [1]. Konvansiyonel yöntemlere göre düşük boyutsal hassasiyet, yüksek yüzey pürüzlülüğü ve yöntemin tekrarlanabilirliği konusundaki sıkıntılara rağmen [2], katmanlı imalat, kalıba gereksinim duymadan üretime olanak vermesi, kısa sürede az miktarda karmaşık tasarımların üretilmesini sağlaması, ham malzeme/parça ağırlığı oranının (Buy-to-Fly ratio) düşük olması avantajlarından dolayı biyomedikal, havacılık, otomotiv ve hızlı prototipleme/kalıplama alanlarında başarılı bir şekilde kullanılmaktadır [3]. Konvansiyonel yöntemlerle üretilmesi çok zor veya imkansız olan parçaların üretimine olanak vermesi ve bu sayede daha hafif parçalar elde edilebilmesi nedenleri ile katmanlı imalat günden güne özellikle havacılık sanayiinde tercih edilebilir bir üretim yöntemi olarak karşımıza çıkmaktadır [4]. Yapılan tasarımlarda neredeyse sınırsız geometri ve karmaşıklık esnekliğine olanak vermesi, katmanlı imalatın ortopedi ve kemik naklinde de kullanılma oranını artırmaktadır [5] (Şekil 1). Katmanlı imalatın şekil optimizasyonuna izin vermesi, ürün performansının artırılması ve daha düşük üretim maliyetleri elde edilmesi noktasında önemli gelişmeler sağlamıştır [6, 7].

Pazarının, 2020 yılına kadar 21 Milyar Dolara kadar büyüyeceği tahmin edilen [9] katmanlı imalat, konvansiyonel yöntemlerin aksine, malzeme çıkarma değil malzeme ekleme prensibine dayanır. Bu amaçla

da bilgisayar destekli lazer veya elektron ışını gibi kaynakları enerji kaynağı olarak kullanır [10].



Şekil 1. Medikal sanayiinde kullanılan ve katmanlı imalatla üretilen Titanyum implantlar [8].

Katmanlı imalatın kendine has özellikleri aşağıdaki kazanımların elde edilebilmesini sağlamıştır [11];

- Parça üretimi için herhangi bir kalıba ihtiyaç duyulmaması nedeni ile, üretim zamanının ve maliyetinin azalması.
- Ekonomik olarak düşük miktardaki üretimlerin yapılabilmesi
- Tasarımda hızlı değişiklik yapılabilmesine olanak vermesi
- Hemen hemen hiç artık malzeme çıkmaması.

F2792 nolu ASTM standardına göre katmanlı imalat 7 farklı kategoride tanımlanmıştır. Katmanlı imalat çeşitlerini farklı firmalar ve kurumlar farklı şekillerde adlandırsa da, genel olarak kullanılan üç farklı türü vardır; lazer sinterleme, lazer ergitme, lazer metal biriktirme [12]. Enerji kaynağı olarak elektron ışının kullanıldığı yöntem ise elektron ışınıyla ergitme yöntemi denir.

Lazer sinterleme 1980'li yıllarda Texas Üniversitesinde görevli Carl ve Joe tarafından geliştirilmiş ve patenti alınmıştır. Daha önceden serilen tozların, lazer kullanılarak sinterlenmesi esasına dayanır. Her bir toz tanecığı üzerinde lazerin çarpma süresi 0,5-25 ms olduğu için, tozlar kısmen ergitilir ve soğutulur, dolayısıyla katı bir cisim oluşturmak için birbirlerine bağlanır [10].

Lazer ergitme yöntemi, lazer sinterleme yöntemi ile aynıdır. Tek fark, lazer ergitmede, daha yüksek lazer gücü ve daha küçük odaklanmış nokta büyüklüğü kullanılarak metal tozlarının tamamen ergitilmesi ve soğutulmasıdır. Bu sayede % 99,9 yoğunlukta parçalar elde edilebilmektedir [12, 13].

Lazer metal biriktirme yönteminde ise, odaklanmış bir lazer ışını, hedef parçanın yüzeyini ergiterek küçük bir ergimiş havuz oluşturur. Bu bölgeye gönderilen metal tozları, bu havuz içinde ergir ve parçanın bir katmanını oluşturur, bu sayede üç boyutlu bir yapı, her seferinde tozların havuzun içinde ergimesi ve soğuması neticesinde katman katman oluşur [10].

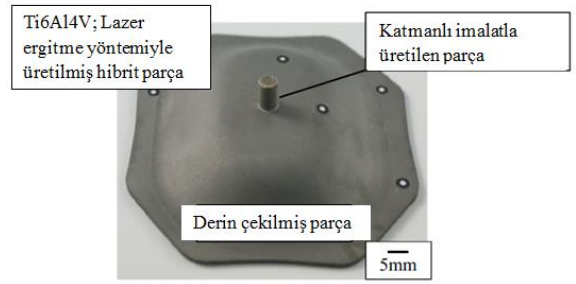
#### Uçak Sanayiinde Katmanlı İmalat Kullanımı

Uçak sanayiinde, üretilecek parçaların ağırlıkları çok önemlidir. Konvansiyonel yöntemlerle yapılan üretimin getirdiği kısıtlar çoğu zaman az ağırlığa ve yeterli dayanıma sahip bir tasarım yerine üretilebilir ancak daha ağır parçaların kullanımına yol açmaktadır. Katmanlı imalatla konvansiyonel yöntemlerle üretimi neredeyse imkansız olan uçak parçaları, optimize edilerek üretilebilmektedir (Şekil 2).

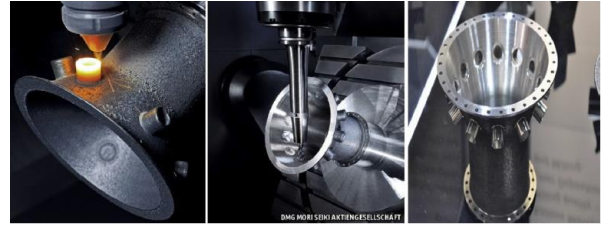


Şekil 2. Topoloji optimizasyonu yapılarak katmanlı imalatla üretilen uçak parçaları [8].

Katmanlı imalat teknolojisi özellikle çok büyük parçaların üretiminde yetersiz kalmaktadır. Dolayısıyla, konvansiyonel yöntemlerle yapılan üretime destek olmak için katmanlı imalatın da üretime dahil edilmesi (hibrit katmanlı imalat) son yıllarda uçak sanayiinde artan oranda araştırılmaktadır [14] (Şekil 3 ve 4).



Şekil 3. Derin çekme ve lazer ergitme yöntemleriyle üretilmiş hibrit parça [14].



Şekil 4. Katmanlı imalat ve CNC işleminin beraber kullanıldığı türbin kutusu [15].

Uçak parçalarının üretim ve malzeme fiyatlarının yüksek olması, bu parçaların bir hasar durumunda değiştirilmesinden ziyade tamir edilmesini zorunlu hale getirmektedir. Katmanlı imalat bu amaçla kullanılan yöntemlerden birisidir. Bu yöntemde, hasar görmüş kısım önce katmanlı imalat yöntemiyle doldurulur, daha sonra CNC işleme ile son haline getirilerek tamir edilmiş olur [16]. Şekil 5'te yüksek maliyetli bir dahili kanatlı helikopter pervanesinin katmanlı imalat ve CNC işleme ile tamir edilmesi görülmektedir.



Şekil 5. Önce katmanlı imalatla hasarlı kısmının doldurulduğu, sonra CNC işlemle son haline getirildiği bir helikopter pervanesi [15].

#### Katmanlı İmalatta Titanyum (Ti) Kullanımı

Katmanlı imalatla alaşım malzemeleri daha çok kullanılmaktadır ve kullanılan toz boyutları farklı üretim yöntemlerine göre 10-200 µm arasında değişmektedir [17]. Bunun sebebi, saf metallerin, mekanik özellikler, paslanma dirençleri vs. gibi özelliklerinin alaşım malzemelerinkine göre daha düşük olmasıdır [12].

Ti alaşımları, özellikle Ti6Al4V, düşük yoğunluğu, yüksek mukavemeti ve yüksek paslanma direncinden dolayı, havacılık sanayii başta olmak

üzere birçok alanda kullanılmaktadır [18]. Konvansiyonel yöntemlerle üretim maliyetinin yüksek, üretim süresinin uzun olması, araştırmacıları, Ti alaşım parçalarını katmanlı imalat yöntemiyle üretime yönlendirmektedir [1].

Diğer malzemelere göre Ti fiyatının yüksek olması, Ti parçalarının üretimini kısıtlamaktadır. Ti parça üretimini arttırmak için katmanlı imalat alternatif bir üretim yöntemi olarak denenmektedir. Çünkü bu yöntem sayesinde neredeyse sifira yakın artık malzeme oluşmaktadır. Ham malzeme/parça ağırlığı oranı konvansiyonel yöntemlerde ortalama 10-20 iken, katmanlı imalatla 1'e düşebilmektedir [19]. Katmanlı imalatla her bir işlemede kullanılmayan ve artan tozlar, bir sonraki işlemede kullanılabilir. Katmanlı imalatla üretilen parçaların malzeme özellikleri, form verme veya döküm gibi konvansiyonel yöntemlerle üretilen parçaların özellikleri ile karşılaştırılabilir seviyededir. Özellikle katmanlı imalatla üretilen parçaların çekme özellikleri ve sertlikleri, yüksek soğuma oranlarından dolayı, işlenmiş veya döküm malzemelerin özelliklerinden genelde yüksektir [20].

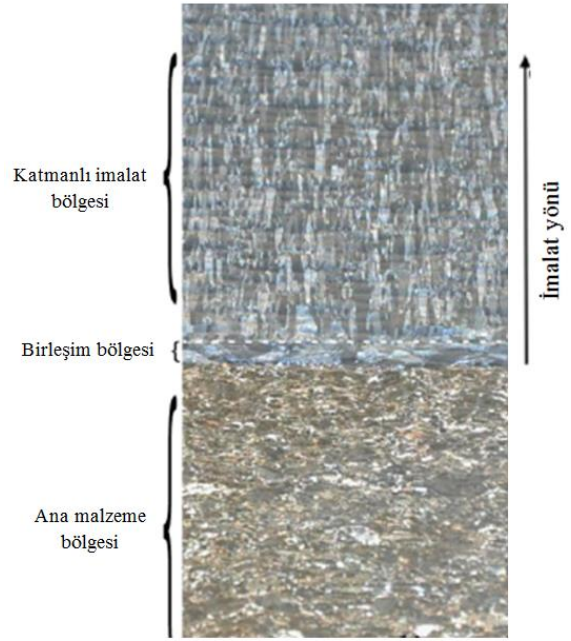
### KATMANLI İMALATLA ÜRETİLEN Ti ALAŞIM PARÇALARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİ VE BUNLARI ETKİLEYEN FAKTÖRLER

Katmanlı imalatla üretilen parçaların malzeme özellikleri, form verme veya döküm gibi konvansiyonel yöntemlerle üretilen parçaların özellikleri ile karşılaştırılabilir seviyededir. Özellikle katmanlı imalatla üretilen parçaların çekme özellikleri ve sertlikleri, yüksek soğuma oranlarından dolayı, işlenmiş veya döküm malzemelerin özelliklerinden genelde yüksektir [20].

Katmanlı imalatla üretilen parçalar, konvansiyonel yöntemlerle üretilen parçalardan daha yüksek yüzey pürüzlülüğüne sahiptir. Bu yüksek yüzey pürüzlülüğü, gerilim yoğunlaşmasını artırır ve parçanın, yorulmadan dolayı daha erken hasara uğramasına yol açar. Her ne kadar parçada meydana gelen gözenekli yapı ve katmanlar arasındaki birleşimin yetersiz olması, yorulma süresini azaltsa da, parçaya yüzey işlemlerinin uygulanması veya sıcak izostatik presleme ile parçanın yoğunluğunun artırılması (gözeneklerin azaltılması), yorulma özelliklerinin işlenmiş veya döküm parçalarla kıyas edilebilir seviyeye yükselmesini sağlar [1].

Zhu ve arkadaşları yaptıkları çalışmada 6 kW lazer ışın gücü, 800-1200 mm/s tarama hızı, 4-6 mm ışın çapı ve 500-1000 g/s toz besleme hızı kullanarak Ti alaşım parçalar ürettişlerdir. Katmanlı imalatla üretilen parçanın üç farklı bölge oluştuğunu belirtmişlerdir; katmanlı imalat bölgesi, ana malzeme bölgesi, birleşim bölgesi (Şekil 6). Birleşim bölgesindeki çekme dayanımı ve uzama sırasıyla  $1033 \pm 13$  MPa ve  $6,8 \pm 0,2$  iken, bu değerler katmanlı imalat bölgesinde  $1103 \pm 12$  MPa,  $14,0 \pm 1,1$ , ana malzeme bölgesinde ise  $982 \pm 10$  MPa,  $8,9 \pm 2,7$ 'dir. Görüldüğü gibi ana malzemeden katmanlı

imalat bölgesine doğru gidildikçe, çekme dayanımı sürekli artmaktadır [20].



Şekil 6. Katmanlı imalatla üretilen parçalardaki üç farklı bölge [21]

Carroll ve arkadaşları metal biriktirme yöntemi ile üretilen Ti6Al4V parçaların çekme özelliklerini incelemiştir. Çalışmada 2000 W lazer gücü ve 10,6 mm/s tarama hızı kullanılmıştır. Çalışma sonucunda elde edilen bütün numunelerin akma ve azami çekme dayanımları yaklaşık  $959 \pm 22$  ve  $1064 \pm 23$  MPa çıkmıştır (İşlenmiş Ti6Al4V plakanın aynı değerleri ise sırasıyla  $973 \pm 8$  ve  $1050 \pm 8$  MPa'dır) [22].

Ren ve arkadaşları lazer ertirme yöntemiyle üretilen Ti-6.5Al-3.5Mo-1.5Zr-0.3Si titanyum alaşım parçalarının mekanik özelliklerini incelemiştir. Yazarlar, elde edilen numunelerin akma ve azami çekme dayanımlarının (1030 ve 1101 MPa), işlenmiş malzemeninkilere (998 ve 1119 MPa) yakın çıktığını belirtmişlerdir. Lazer ertirme yöntemiyle üretilen numunelerin sünekliklerinin çok düşük olduğu, bunun sebebinin ise yükleme yönüne dik yöndeki tanecik sınırlarının çok olması olduğu belirtilmiştir [23].

Song ve arkadaşlarının lazer ertirme yöntemiyle yaptığı çalışmalar sonucunda elde ettikleri Ti6Al4V parçaların yüzey pürüzlülüğü  $2,1\mu\text{m}$ , mikrosertliği ise 450 HV çıkmıştır. 110W lazer gücü ve 0,4 m/s tarama hızının kullanıldığı çalışmalarda elde edilen yoğunluk ( $4,13 \text{ g/cm}^3$ ), ham Ti6Al4V alaşımıninkine ( $4,30 \text{ g/cm}^3$ ) yakın çıkmıştır [24].

Yu ve arkadaşları lazer metal biriktirme yöntemiyle üretilen Ti6Al4V parçaların mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Biriktirme işlemi zemindeki 10 mm kalınlığındaki Ti6Al4V plaka üzerine yapılmıştır. Üretilen parçaların sertlikleri, zemindeki plakaninkinden yüksek ( $360 \pm 10$  HV) çıkmıştır. Yine akma ve azami çekme dayanımları da ( $976 \pm 24$  MPa ve  $1099 \pm 2$  MPa) döküm veya tavllanmış Ti6Al4V malzemeninkilerden yüksek çıkmıştır. Diğer taraftan uzama miktarı ( $4,9 \pm 0,1$ ), döküm veya tavllanmış Ti6Al4V malzemeninkinden düşük çıkmıştır [25].

Katmanlı imalatla üretilen Ti alaşım parçalarının mekanik özellikleri üzerinde birçok faktörün etkisi vardır;

### Tarama Hızının Etkisi

Eş zamanlı olarak ergitilen noktaların miktarını belirleyen parametreye tarama hızı denilmektedir.

Wang ve arkadaşları 30-50  $\mu\text{m}$  çapında tozlar ve elektron ışınıyla ergitme yöntemini kullanarak Ti6Al4V parçalar üretmişlerdir. 70  $\mu\text{m}$  katman kalınlığı ve dört farklı tarama hızının (214 mm/s, 376 mm/s, 529 mm/s ve 689 mm/s) kullanıldığı çalışmada, işlenmiş Ti6Al4V alaşımları ile kıyaslanabilir seviyelerde Young modülüne (111,7 ~ 119,0 GPa) ve ortalama sertliğe (5,24 ~ 6,52 GPa) sahip parçalar elde edilmiştir. Hem Young modülünün hem de sertliğin, tarama hızı ile arttığı ve bunun sebebinin daha ince mikroyapıların oluşması olduğu belirtilmiştir [26].

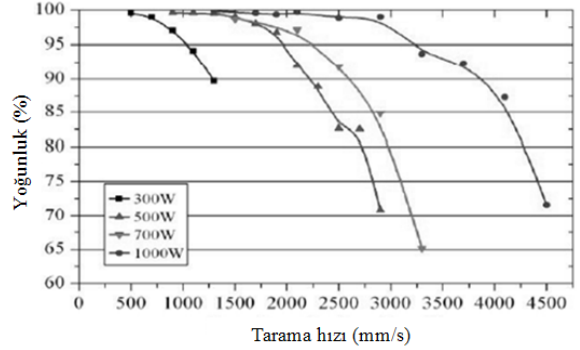
Farklı bir sonuç, Kempen ve arkadaşları tarafından belirtilmiştir. Lazer ergitme yönteminde, işleme parametreleri olarak 100 W lazer gücü, 30  $\mu\text{m}$  katman kalınlığı, 150 mm/s tarama hızı ve 112  $\mu\text{m}$  yanıl kayma mesafesi kullanılmıştır. Yazarlar, tarama hızı arttıkça, yoğunluğun azaldığını, bunun da sertlikte düşüşe sebep olduğunu belirtmişlerdir [27].

Buchbinder ve arkadaşlarının yoğunluk ve mikrosertlik üzerinde lazer gücü, tarama hızı ve yanıl kayma mesafesinin etkisinin incelendiği çalışmada, yoğunluğun, tarama hızıyla azaldığı belirtilmiştir. Mikrosertlik ise bu parametrelerden doğrusal olarak etkilenmemiştir (Şekil 7) [28].

### Lazer Gücünün Etkisi

Ergitme kapasitesi ve tarama için gerekli olan enerji lazer gücü ile sağlanır. Buchbinder ve arkadaşlarının yaptığı çalışmaya göre, yoğunluk, lazer gücü ile orantılı olarak artmaktadır [28].

Casalino ve arkadaşları, ergitme yönteminde, lazer gücü ve tarama hızının, sertlik, azami çekme dayanımı, uzama ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisini incelemişlerdir. 57, 86 ve 100 W lazer gücü ve 180, 200 ve 220 mm/s tarama hızının kullanıldığı çalışmada, enerji yoğunluğu (lazer gücünün, tarama hızı, katman kalınlığı ve yanıl kayma mesafesinin çarpımına oranı) arttıkça, parçanın yoğunluğunun arttığı belirtilmiştir. Parçanın yoğunluğunun artması sertlik, azami çekme dayanımı ve uzamada artışa, yüzey pürüzlülüğünde ise azalışa sebep olmuştur [29].



Şekil 7. Yoğunluk üzerinde lazer gücü ve tarama hızının etkisi [28]

### Katman Kalınlığının Etkisi

Katmanlı imalat yöntemlerinde geometri inşa yönünde eşit aralıklarla bölünerek üretilir. Her bir aralığın yüksekliği ise katman kalınlığı olarak adlandırılır.

Guan ve arkadaşlarının lazer ergitme yöntemi ile üretilmiş numunelerin statik özellikler üzerinde, katman kalınlığı, işleme yönü ve işleme açısının etkisini inceledikleri çalışmalarında, 200 W lazer gücü, 15 m/dak tarama hızı, 20, 30 ve 40  $\mu\text{m}$  katman kalınlığı, 90, 105, 120, 135 ve 150 işleme açısı ve 0, 45 ve 90° işleme yönü kullanmışlardır. Katman kalınlığının statik özellikler üzerinde ciddi bir etkisinin olmadığı gösterilmiştir [30].

Bu çalışmadan farklı olarak, Kempen ve arkadaşların yaptığı çalışmaya göre, katman kalınlığı arttıkça, mekanik özelliklerde düşüş meydana gelmektedir. Yazarlar bu düşüşü parçanın yoğunluğundaki düşüşe bağlamaktadır [27].

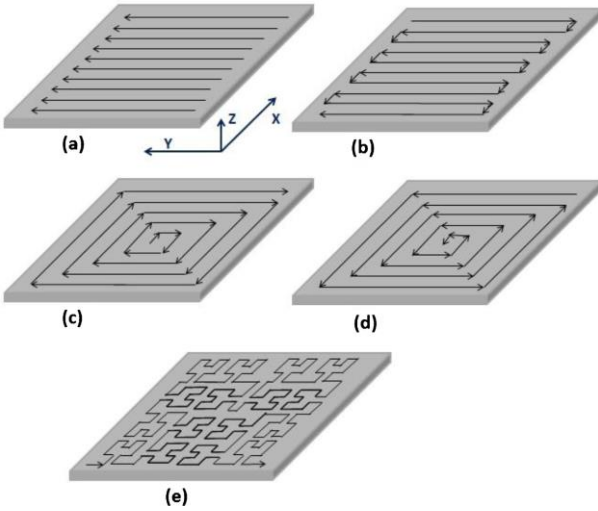
Basalah ve arkadaşları, sinterleme sıcaklığını ve katman kalınlığını değiştirerek ürettikleri katmanlı imalat numunelerinde farklı gözeneklilik (% 17-44), Young modülü (0.77-11.46 GPa) ve akma dayanımı (27-383 MPa) değerleri elde etmişlerdir. Yazarlar katman kalınlığı arttıkça (62,5, 87,5, 105, 125, 150 ve 175  $\mu\text{m}$ ) gözenekliliğin arttığını ama Young modülü ve akma dayanımının azaldığını belirtmişlerdir.



Sinterleme sıcaklığı arttığında ise (800, 1000, 1200, 1400 °C) tam tersi sonuç çıkmıştır [31].

### Tarama Deseni ve İnşa Yönünün Etkisi

İnşa yönü, üretilen geometrinin katmanlara dik olan kurulum yönünü nitelendirir. Katmanlı imalatta kullanılan genel olarak dört farklı tarama deseni vardır; ızgara deseni, çift yönlü desen, kaçıklık deseni ve fraktal desen (Şekil 8). Kaçıklık deseni ve fraktal desen, daha az enerjiye ihtiyaç duyduğu ve geometrik olarak hassas parçaların üretimine olanak sağladığı için diğer desenlere göre daha çok tercih edilir [32]



Şekil 8. Farklı tarama desenleri: (a) ızgara, (b) çift yönlü, (c) dışa doğru kaçıklık, (d) içe doğru kaçıklık, (e) fraktal [33].

Katmanlı imalatta parçanın inşa yönü, elde edilen parçanın mekanik özellikleri üzerinde etkilidir. Çekme testi uygulanacak parçalarda, çekme yönüne paralel yönde oluşturulan parçalar, çekme yönüne dik olarak oluşturulan parçalara göre daha yüksek çekme dayanımlara sahiptirler [33].

Farklı inşa yönlerindeki farklı soğuma oranları da parçanın mikroyapısını, dolayısıyla mekanik özelliklerini etkilemektedir. Örneğin, X eksenini boyunca parça oluştururken (çekme yönüne paralel), lazerin, katmanlar arasındaki geçiş süresi, Y veya Z eksenini boyunca parça oluştururken gerekli geçiş süresinden daha fazladır. Dolayısıyla, X eksenini boyunca parça oluştururken daha yüksek soğuma oranları ve daha ince mikroyapı elde edilir [34].

Guan ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, dikey biriktirme yönü (çekme yönü) ile daha iyi dayanım ve uzama değerleri elde edildiği belirtilmiştir [30].

Lazer ergitme yönteminde biriktirme yönünün Ti6Al4V'nin mekanik özellikleri üzerindeki etkisi

Wauthle ve arkadaşları tarafından incelenmiştir. 45° yönünde işlenmiş parçaların akma ve maksimum çekme dayanımlarının, dikey ve yatay işlenmiş parçalarından % 35 daha az olduğu belirtilmiştir [35].

Casati ve arkadaşları, yatay yönde üretilen numunelerin azami çekme dayanımlarının (684,7 MPa) ve sünekliklerinin (% 36,3) dikey yönde üretilen numunelerinden (580,7 MPa, % 25,7) daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir [36].

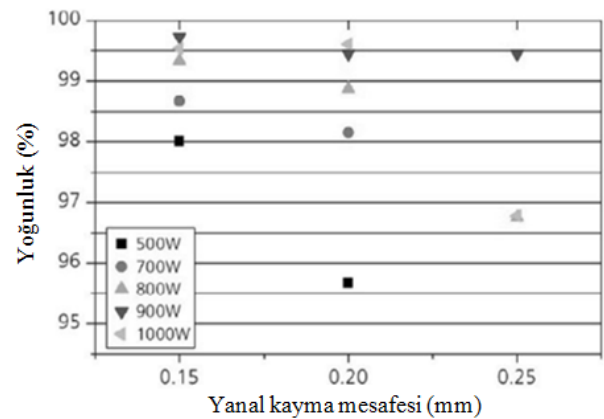
İnşa yönünün Ti6Al4V parçaların yorulma performanslarına etkisi Wycisk ve arkadaşları tarafından çalışılmıştır. Elde edilen sonuçlar, zemine göre 45° ve 90° yönlerinde inşa edilen parçaların yorulma performansında ciddi bir değişimin olmadığını göstermiştir [37].

Hrabe ve Quinn, elektron ışınıyla işlemede inşa yönünün Ti6Al4V parçaların mekanik özellikleri üzerindeki etkisini inceledikleri çalışmalarında, inşa yönü değişikçe parçanın akma ve azami çekme dayanımlarının değişmediğini (azami çekme dayanımı: X-Y yönünde 1017-1030 MPa, Z yönünde 1009-1033 MPa, akma dayanımı: X-Y yönünde 967-983 MPa, Z yönünde 961-984 MPa) ama uzamanın X-Y yönünde, Z yönüne göre % 30 daha fazla çıktığını belirtmişlerdir (X-Y yönünde % 12,2, Z yönünde % 7,0-9,0) [38].

### Yanal Kayma Mesafesinin Etkisi

Yanal kayma, katmanlar oluşturulurken kullanılan tarama desenleri arasındaki geçiş mesafesidir.

Buchbinder ve arkadaşları yoğunluğun yanal kayma mesafesiyle azaldığını belirtmişlerdir. (Şekil 9) [28].



Şekil 9. Yoğunluk üzerinde lazer gücü ve yanal kayma mesafesinin etkisi [28]

Yapay protezlerde titanyum kullanımının önündeki en büyük engel, Titanyumun Young modülü ile (110 GPa), kemiğin Young modülünün (10–30 GPa) farklı olmasıdır. Bu sorunu çözmek için Zhang ve arkadaşları lazer ergitme yöntemiyle ürettikleri gözenekli implantların mekanik özellikleri üzerinde yanal kayma mesafesinin etkisini incelemişlerdir. 65 µm ortalama tanecik büyüklüğüne sahip tozların kullanıldığı çalışmada, işleme parametreleri olarak 130 W lazer gücü, 300 mm/s tarama hızı ve 35 µm katman kalınlığı kullanılmıştır. Deney sonuçlarına göre yanal kayma mesafesi 200 µm'den 700 µm'ye çıkartıldığında, akma dayanımı 862 MPa'dan 467 MPa'a, Young modülü ise 85 GPa'dan 16 GPa'a düşmüştür. Bu sayede kemik dokusunun mekanik özelliklerine yakın özelliklere sahip implantlar üretilebilmiştir [39].

### İmalat Yönteminin Etkisi

Zhai ve arkadaşları Ti6Al4V tozu kullanarak lazer ergitme ve elektron ışınıyla ergitme yöntemlerini kullanarak parça üretmişlerdir. Yazarlar giriş parametreleri olarak iki farklı lazer gücü kullanmışlardır (330 W, 780 W). Çalışma sonucunda, lazer gücü artırılınca, lazer ergitme yöntemi ile üretilen parçaların akma ve azami çekme dayanımlarının sırasıyla 1005 ve 1103 MPa'dan 990 ve 1042 MPa'a düştüğü belirtilmiştir. Elektron ışınıyla ergitme yöntemiyle üretilen parçalarda ise lazer gücü artırılınca, bu özellikler yatay yönde oluşturulan numunelerde 1006 ve 1066 MPa'dan 973 ve 1032 MPa'a, dikey yönde oluşturulan numunelerde ise 1001 ve 1073 MPa'dan 1051 ve 1116 MPa'a düşmüştür. Yazarlar, inşa yönünün yataydan dikeye yani çekme testinin uygulanacağı yöne çevrildiği durumda, akma ve azami çekme dayanım değerlerinin arttığını belirtmişlerdir [40].

Literatürde, lazer ergitme yöntemiyle üretilen Ti6Al4V parçaların akma dayanımları  $976 \pm 24$  MPa, azami çekme dayanımları  $1099 \pm 2$  MPa ve uzaması  $\% 4,9 \pm 0,1$  çıkarken [24], elektron ışınıyla üretilen Ti6Al4V parçaların akma dayanımları 883,7-938,5 MPa, azami çekme dayanımları 993,9-1031,9 MPa ve uzaması ise  $\% 11,6-13,6$  çıkmıştır [41].

### Artık Gerilmelerin Etkisi

Bir malzeme içerisindeki, dış veya kütleles kuvvetlerin yokluğunda, dengede ve sabit sıcaklıkta kalan gerilmelere artık gerilmeler denilmektedir. Katmanlı imalat sırasında farklı katmanlardaki ısınma/soğuma hızlarının farklı olması üretilen parçada artık gerilmelerin oluşmasına sebep olmaktadır. Bunun sonucunda oluşan anizotropik mikroyapıdaki parçalardaki bu artık gerilmeler, parçanın çekme veya yorulma dayanımları gibi diğer

malzeme özelliklerini olumsuz yönde etkilemekte, parçanın ömrünü veya dayanımı azaltmaktadır. Malzeme özellikleri (ısıl iletkenlik, elastik modül, akma dayanımı vs.), faz dönüşümleri, parça geometrisi, işlem parametreleri ve tarama şekli, üretilen parçadaki artık gerilmelerin büyüklüğü ve dağılımını etkilemektedir. Bir parçadaki artık gerilmeler, parçanın akma dayanımının %75'ine kadar çıkabilmektedir [32]. Bu gerilme malzemenin akma dayanımından fazla ise eğrilme veya plastik deformasyon, azami çekme dayanımından fazla ise çatlama meydana gelir. [42].

Shuangyin ve arkadaşlarının Ti6Al4V alaşımını lazer biriktirme yönteminde kullanırken belirttiği gibi, biriktirme düzlemindeki artık gerilmeler lazer tarama yönü ile aynı hizadadır. Ayrıca, lazer taramanın başlangıç noktasında artık gerilmeler düşük, taramanın sonlarına doğru ise artmaktadır. İlk katmanlarda artık basma gerilmeler daha fazladır, katman kalınlığı arttıkça daha düşük artık çekme gerilmeleri görülür [43].

Popovich ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, lazer ergitme yöntemiyle üretilen numunelerin azami çekme dayanımlarının, sıcak haddelenmiş parçalarına göre  $\% 20-25$  daha az olduğunu belirtmişlerdir. Bunun muhtemel sebebinin ise lazer ergitme yöntemiyle üretilmiş parçalarda kalan artık gerilmeler olduğunu belirtmişlerdir [44].

Katmanlı imalatla üretilen parçalar hemen hemen tam yoğunlukta ( $\sim \%98-99$ ) olmasına rağmen, yüksek dayanım gerektiren uygulamalarda, çok az artık gerilmeler bile sorun olabilmektedir. Artık gerilmeleri asgari seviyeye indirmek için tekrar ergitme yöntemi uygulanabilmektedir. Bu yöntemde, bir katman tarandıktan sonra, üzerine yeni bir katman sermeden, mevcut katman tekrar taranır. Yasa, bu yöntem sayesinde artık gerilmelerin  $\% 0,036$ 'ya kadar azaltılabileceğini belirtmiştir [45].

İşleme parametrelerini değiştirerek, özellikle kenarlarda olmak üzere parça boyunca mümkün olduğu kadar homojen bir sıcaklık dağılımı yapıldığı takdirde, artık gerilmelerin azaldığı belirtilmiştir [46].

### Mikroyapı ve Gözenekliliğin Etkisi

Katmanlı imalatla tozların ergitme sıcaklıklarından daha yüksek sıcaklara çok hızlı bir şekilde ısıtılması ve devamında ergiyen tozun hızlı bir şekilde soğutulması ve her bir katmanda bu işlemin devam etmesi, uzamış tanecik yapılı, anizotropik özelliklere sahip parçaların oluşmasına yol açmaktadır [32].

Yüksek tarama hızı ve düşük lazer gücü, parçada daha yüksek soğuma hızına ve daha ince bir

mikroyapıya yol açar. Tarama hızı azaltılıp, lazer gücü artırıldıkça tam tersi (daha düşük soğuma hızı ve daha kaba bir mikroyapı) sonuçlar elde edilir [47].

Ahn ve arkadaşları elektron ışını enerji kaynağı olarak kullandıkları çalışmalarında Ti parçaların mekanik özelliklerini ve mikroyapılarını incelemişlerdir. 4-18 mA elektron ışın gücü, 60 kV ivme voltajı ve 400 mm/s tarama hızının kullanıldığı çalışmada, % 76 gözenekli yapıdaki parçalar elde edilmiştir. Gözenek miktarının artması ile akma geriliminin ve elastik modülünün azaldığı belirtilmiştir [48].

Attar ve arkadaşları lazer ergitme yöntemiyle üretilen ticari saf Ti parçaların mekanik özelliklerini incelemişlerdir. 70-250 W lazer gücü, 20-180 mm/s tarama hızı, 100 µm katman kalınlığı ve yanal kayma mesafesinin işleme parametreleri olarak kullanıldığı çalışmada, lazer gücü ve tarama hızının artmasıyla, yoğunluğun ve artık gerilimlerin artacağı,  $\alpha$ 'dan  $\alpha'$  fazına geçişin olacağı ve bu sayede üretilen parçanın yüzey mikrosertliğinin (261 HV'ye kadar), akma dayanımının (555 ± 3 MPa'a kadar) ve azami çekme dayanımının (757 ± 12,5 MPa'a kadar) arttığı belirtilmiştir. Ticari saf Ti'nin 890 °C'den daha yüksek sıcaklıklarda  $\alpha$  yapıdan (altıgen sıkı yapı)  $\beta$  yapıya (hacim merkezli kübik yapı), allotropik bir faz dönüşümü gerçekleştirdiği ve bu  $\alpha$ - $\beta$ - $\alpha$  faz dönüşümünün doku, mikroyapı ve kayma sistemleri üzerinde etkili olduğu belirtilmiştir. Lazer ergitme ile üretilen Ti parçaların mekanik özelliklerinin (akma ve azami çekme dayanımı), levhadan form verilmiş (280 MPa, 345 MPa) veya tavllanmış parçalardan (432 MPa, 561 MPa) daha yüksek olduğu belirtilmiştir [49].

Furumoto ve arkadaşlarının deney sonuçlarına göre; enerji yoğunluğu artıkça, ergimenin artmasından dolayı gözeneklilik azalmaktadır. Gözenekliliğin azalması, geçirgenliği azaltmakta ama mikro sertlik ve çekme dayanımını arttırmaktadır [50].

Lazer ergitme yönteminde işleme parametrelerinin gözeneklilik üzerindeki etkisi Kasperovich ve arkadaşları tarafından çalışılmıştır. Çalışmada, Ti6Al4V tozlarla birlikte, 100-200 W lazer gücü, 200-1100 mm/s tarama hızı, 40-180 µm yanal kayma mesafesi ve 30 µm katman kalınlığı parametreleri kullanılmıştır. Çalışma sonucunda, diğer bütün parametreler sabit iken gözeneklilik üzerinde tarama hızının en fazla etkili, yanal kayma mesafesinin ise en az etkili olduğu belirtilmiştir [51].

Qiu ve arkadaşları lazer ergitme yöntemi ve farklı işleme parametreleri kullanarak Ti6Al4V numuneler üretmişlerdir. 20-50 µm boyutlarında tozların

kullanıldığı çalışmada, giriş parametreleri olarak 75 µm yanal kayma mesafesi ve 1,5 g/s toz besleme hızı kullanılmıştır. Lazer gücü ve tarama hızı arttıkça gözenekliliğin azaldığı belirtilmiştir. Yatay yönde işlenmiş numunelerin gözenekliliği dikey yönde işlenmiş numunelerinkinden daha yüksek çıkmıştır. İşlenmiş parçalarda yüksek dayanımlar göze çarparken süneklilik düşük çıkmıştır [52].

### Isıl İşlemin Etkisi

Katmanlı imalatla üretilen parçalarda müteakip katmanların mikrosertlikleri ilk katmandan sonra düşmekte, sonradan ise son katmana doğru artmaktadır. Bunun sebebi orta katmanlardaki soğuma hızının ilk ve son katmanlardakine oranla çok daha düşük olmasıdır. Ayrıca, önceki ve sonraki katmanlardaki ısınma/soğumadan dolayı orta katmanlar sürekli ısı değişimine maruz kalmaktadır. Dolayısıyla daha yüksek soğuma hızına sahip üst ve alt katmanların mikrosertlikleri, orta katmanlara göre daha yüksek çıkmaktadır [32]. Daha homojen bir mikrosertlik dağılımı ve yoğunluğun artırılması için katmanlı imalatla işlemeden sonra ısıl işlem uygulanabilmektedir.

Vrancken ve arkadaşları lazer ergitme yöntemiyle üretilen Ti6Al4V test numunelerinin mekanik özellikleri üzerinde ısıl işlemin etkisini incelemişlerdir. 1600 mm/s tarama hızı, 250 W lazer gücü, 60 µm yanal kayma mesafesi ve 30 µm katman kalınlığının kullanıldığı çalışmada, üretilen parçaların akma ve azami çekme dayanımlarının (1110 ve 1267 MPa) referans parçaya göre (960 ve 1006 MPa) daha yüksek çıktığı belirtilmiştir. Bunun sebebinin ise hızlı soğuma sonucu oluşan ince mikroyapı olduğu belirtilmiştir. Isıl işlem uygulandığında ise akma ve azami çekme dayanımları azalmıştır [53].

Leuders ve arkadaşları lazer ergitme yöntemiyle üretilen Ti6Al4V parçaların mekanik özelliklerini incelemişlerdir. 40 µm ortalama tanecik büyüklüğüne sahip tozlar ve 30 µm katman kalınlığının kullanıldığı çalışmada, 1008 MPa akma dayanımı, 1080 MPa azami çekme dayanımı ve % 1,6 kopma uzaması değerleri elde edilmiştir. Parçalar ısıl işleme tabi tutulduğunda, akma ve azami çekme dayanımı azalırken, kopma uzaması artmıştır [54].

Uhlmann ve arkadaşları küresel Ti6Al4V tozları kullanarak lazer ergitme yöntemiyle uçak parçaları üretmişlerdir. 275 W lazer gücü ve 975 mm/s tarama hızının kullanıldığı çalışmada, eğer katmanlı imalattan sonra sıcak izostatik presleme uygulanırsa, parça yoğunluğunun % 96,95'ten % 99,19'a çıktığı belirtilmiştir [55].

## Tozların Tekrar Kullanılmasının Etkisi

Katmanlı imalatla her bir serimde tezgâha serilen ama kullanılmayan tozlar bir sonraki işlemede kullanılabilir. Fakat tozların bu birden fazla kullanıma durumu, tozların özelliklerinde değişime neden olabilir. Kullanım sayısı arttıkça tozlar daha küresel hale gelir, akışkanlıkları artar, tozların içerisindeki oksijen miktarı ve dolayısıyla akma ve azami çekme dayanımları artar. Bu konuda yakın zamanda yapılan bir çalışmada, elektron ışınıyla işlemede, Ti6Al4V tozlarının 21 defa kullanılmaları durumunda, tozlardaki oksijen miktarının ağırlıkça % 0,08'den 0,19'a arttığı, alüminyum miktarının % 6,47'den 6,37'ye düştüğü, vanadyum miktarının da % 4,08'den 4,03'e düştüğü belirtilmiştir [56].

## SONUÇ

Düşük yoğunluk, yüksek mukavemet ve yüksek paslanma direnci gibi üstün özelliklerinden dolayı, havacılık sanayinde kullanımı sürekli artan Ti alaşımların, katmanlı imalat yöntemiyle üretimde kullanılmasıyla elde edilen parçaların mekanik özellikleri ve bu özellikler üzerine etki eden faktörlerin incelendiği bu çalışmada, aşağıdaki genel sonuçlar çıkarılabilir:

- Katmanlı imalatla üretilen parçaların mekanik özellikleri, yüksek soğuma oranlarından dolayı, işlenmiş veya döküm malzemelerin özelliklerinden genelde yüksektir.
- Tarama hızı, katman kalınlığı ve yanal kayma mesafesi arttıkça yoğunluk ve mekanik özellikler azalmakta, lazer gücü arttıkça artmaktadır.
- İnşa yönü parçanın çekme yönünde ise, diğer yönlere göre mekanik özellikler yüksek çıkmaktadır.
- Isıl işlem uygulandığında, parçalarda gözeneklilik, artık gerilmeler ve mekanik özellikler düşmektedir.

Literatürden elde edilen bilgilere göre aşağıdaki konularda detaylı çalışmaların yapılması gerektiği, literatürde bu alanlarda eksiklikler olduğu görülmüştür;

- Katmanlı imalatla üretilen parçaların mikroyapı özellikleri imalat sırasındaki yüksek ısınma/soğuma oranları, hızlı sıcaklık yükselmesi gibi ısıl etkenlerden ciddi oranda etkilenmektedir. Birçok üretim parametresi bu ısıl etkenleri değiştirdiği için, katmanlı imalatla üretilen parçaların mikroyapı özellikleri ve bunların işleme

parametreleriyle nasıl değiştiği konusunda önemli araştırma eksikliği vardır [32].

- Uçak parçalarının üretiminde katmanlı imalatın CNC işleme ile beraber kullanılması (hibrit üretim) konusunda araştırma eksikliği vardır.
- Maliyeti yüksek uçak parçalarının hasar görmesi durumunda, bu parçaların yeniden üretilmesinden ziyade, katmanlı imalatla tamir edilmesi noktasında literatürde daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyulmaktadır.
- Literatürde, katmanlı imalatla üretilen parçaların yorulma dayanımları konusunda çalışmalar olmasına rağmen, katmanlı imalata özgü gerinim ve/veya gerilim tabanlı yorulma modeli çıkarılması konusunda önemli araştırma eksikliği vardır.

## MECHANICAL PROPERTIES OF Ti6Al4V PARTS PRODUCED BY ADDITIVE MANUFACTURING

In this study, mechanical properties of Ti alloy parts produced by additive manufacturing and factors that have effects on these properties are investigated in detail. The effect of not only production parameters such as hatch spacing, scanning speed and layer thickness, but also factors such as production type, residual stresses after production and heat treatment on mechanical properties are investigated. According to the findings from literature review, possible future implementations of this process are mentioned in the result section by listing the subjects on which works are insufficient.

**Keywords:** Additive Manufacturing, Scanning Speed, Layer Thickness, Residual Stress

## KAYNAKÇA

1. Herzog, D., Seyda, V., Wycisk, E., Emmelmann, C., "Additive manufacturing of metals", *Acta Materialia*, 117, 2016, 371-392.
2. Baumann, M., Dickens, P., Tuck, C., Hague, R., "The cost of additive manufacturing: machine productivity, economies of scale and technology-push", *Technological Forecasting & Social Change*, 102, 2016, 193-201.
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. 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(4-5), 2016, 571-577.



5. Melchels, F. P. W., Domingos, M. A. N., Klein, T.J., Malda, J., Bartolo, P.J., Huttmacher, D.W., "Additive manufacturing of tissues and organs", *Progress in Polymer Science*, 37, 2012, 1079-1104.
6. Chu, C., Graf, G., Rosen, D. W., "Design for additive manufacturing of cellular structures", *Computer-Aided Design and Applications*, 5(5), 2008, 686-696.
7. Gardan, J., "Additive manufacturing technologies: state of the art and trends", *International Journal of Production Research*, 54(10), 2016, 3118-3132.
8. Thompson, M. K., Moroni, G., Vaneker, T., Fadel, G., Campbell, R. I., Gibson, I., Bernard, A., Schulz, J., Graf, P., Ahuj, B., Martina, F., "Design for additive manufacturing: trends, opportunities, considerations, and constraints", *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 65, 2016, 737-760.
9. Wohlers, T., "Wohlers Report 2015: Global Reports", Wohlers Associates, Belgium, 2015.
10. Wang, M, Lin, X., Huang, W., "Laser additive manufacture of titanium alloys", *Materials Technology*, 31(2), 2016, 90-97.
11. Holmström, J., Partanen, J., Tuomi, J., Walter, M., "Rapid manufacturing in the spare parts supply chain: alternative approaches to capacity deployment", *Journal of Manufacturing Technology Management*, 21(6), 2010, 687-697.
12. Gu, D. D, Meiners, W., Wissenbach K., Poprawe, R., "Laser additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms", *International Materials Reviews*, 57(3), 2012, 133-164.
13. Thijs, L., Verhaeghe, F., Craeghs, T., Humbeeck, J. V., Kruth, J. P., "A study of the microstructural evolution during selective laser melting of Ti-6Al-4V", *Acta Materialia*, 58, 2010, 3303-3312.
14. Merklein, M., Junker, D., Schaub, A., Neubauer, F., "Hybrid additive manufacturing technologies, an analysis regarding potentials and applications", *Physics Procedia*, 83, 2016, 549 - 559.
15. Liu, R., Wang, Z., Sparks, T., Liou, F., Newkirk, J., "Aerospace applications of laser additive manufacturing", *Laser Additive Manufacturing*, 2017, p. 354.
16. Graf, B., Gumenyuk, A., Rethmeier, M., "Laser metal deposition as repair technology for stainless steel and titanium alloys", *Physics Procedia*, 39, 2012, 376-381.
17. Zekovic, S., Dwivedi, R., Kovacevic, R., "Numerical simulation and experimental investigation of gas-powder flow from radially symmetrical nozzles in laser-based direct metal deposition", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47, 2007, 112-123.
18. Banerjee, D., Williams, J. C., "Perspectives on titanium science and technology", *Acta Materialia*, 61(3), 2013, 844-879.
19. Szost, B. A., Terzi, S., Martina, F., Boisselier, D., Prytuliak, A., Pirling, T., Hofmann, M., Jarvis, D. J., "A comparative study of additive manufacturing techniques: Residual stress and microstructural analysis of CLAD and WAAM printed Ti-6Al-4V components", *Materials and Design*, 89, 2016, 559-567.
20. Körner, C., "Additive manufacturing of metallic components by selective electron beam melting — a review", *International Materials Reviews*, 61(5), 2016, 361-377.
21. Zhu, Y., Li, J., Tian, X., Wang, H., Liu, D., "Microstructure and mechanical properties of hybrid fabricated Ti-6.5Al-3.5Mo-1.5Zr-0.3Si titanium alloy by laser additive manufacturing", *Materials Science & Engineering A*, 607, 2014, 427-434.
22. Carroll, B. E., Palmer, T. A., Beese, A. M., "Anisotropic tensile behavior of Ti-6Al-4V components fabricated with directed energy deposition additive manufacturing", *Acta Materialia*, 87, 2015, 309-320.
23. Ren, H., Tian, X., Liu, D., Liu, J., Wang, H., "Microstructural evolution and mechanical properties of laser melting deposited Ti-6.5Al-3.5Mo-1.5Zr-0.3Si titanium alloy", *Transactions of Nonferrous Metal Society of China*, 25, 2015, 1856-1864.
24. Song, B., Dong, S., Zhang, B., Liao, H., Coddet, C., "Effects of processing parameters on microstructure and mechanical property of selective laser melted Ti6Al4V", *Materials and Design*, 35, 2012, 120-125.
25. Yu, J., Rombouts, M., Maes, G., Motmans, F., "Material properties of Ti6Al4V parts produced by laser metal deposition", *Physics Procedia*, 39, 2012, 416-424.
26. Wang, X., Gong, X., Chou, K., "Scanning speed effect on mechanical properties of Ti-6Al-4V alloy processed by electron beam additive manufacturing", *Procedia Manufacturing*, 1, 2015, 287-295.
27. Kempen, K., Yasa, E., Thijs, L., Kruth, J. P., Humbeeck, J. V., "Microstructure and mechanical properties of selective laser melted 18Ni-300 steel", *Physics Procedia*, 12, 2011, 255-263.
28. Buchbinder, D., Schleifenbaum, H., Heidrich, S., Meiners, W., Bültmann, J., "High power selective laser melting (HP SLM) of aluminum parts", *Physics Procedia*, 12, 2011, 271-278.
29. Casalino, G., Campanelli, S. L., Contuzzi, N., Ludovico, A. D., "Experimental investigation

- and statistical optimization of the selective laser melting process of a maraging steel”, *Optics & Laser Technology*, 65, 2015, 151-158.
30. Guan, K., Wang, Z., Gao, M., Li, X., Zeng, X., “Effects of processing parameters on tensile properties of selective laser melted 304 stainless steel”, *Materials and Design*, 50, 2013, 581–586.
  31. Basalah, A., Esmaeili, S., Toyserkani, E., “On the influence of sintering protocols and layer thickness on the physical and mechanical properties of additive manufactured titanium porous bio-structures”, *Journal of Materials Processing Technology*, 238, 2016, 341-351.
  32. Yu, J., Lin, X., Ma, L., Wang, J., Fu, X., Chen, J., “Influence of laser deposition patterns on part distortion, interior quality and mechanical properties by laser solid forming (LSF)”, *Material Science and Engineering A*, 528, 2011, 1094-1104.
  33. 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.
  34. Blackwell, P.L., “The mechanical and microstructural characteristics of laser-deposited IN718”, *Journal of Material Processing Technology*, 170, 2015, 240–246.
  35. 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.
  36. Casati, R., Lemke, J., Vedani, M., “Microstructure and fracture behavior of 316L austenitic stainless steel produced by selective laser melting”, *Journal of Materials Science & Technology*, 32, 2016, 738-744.
  37. 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.
  38. 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.
  39. Zhang, S., Wei, Q., Cheng, L., Li, S., Shi, Y., “Effects of scan line spacing on pore characteristics and mechanical properties of porous Ti6Al4V implants fabricated by selective laser melting”, *Materials and Design*, 63, 2014, 185–193.
  40. 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.
  41. 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.
  42. Sames, W. J., List, F. A., Pannala, S., Dehoff, R. R., Babu, S. S., “The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing”, *International Materials Reviews*, 61(5), 2016, 315-360.
  43. Shuangyin, Z., Xin, L., Jing, C., Weidong, H., “Influence of heat treatment on residual stress of Ti-6Al-4V alloy by laser solid forming”, *Rare Metal Materials and Engineering*, 38, 2009, 774-778.
  44. Popovich, A., Sufiiarov, V. Polozov, I., Borisov, E., Masaylo, D., Orlov, A., “Microstructure and mechanical properties of additive manufactured copper alloy”, *Materials Letters*, 179, 2016, 38–41.
  45. Yasa, E., Kruth, J. P., “Microstructural investigation of selective laser melting 316L stainless steel parts exposed to laser re-melting”, *Procedia Engineering*, 19, 2011, 389-395.
  46. Rangaswamy, P., Griffith, M.L., Prime, M.B., Holden, T.M., Rogge, R.B., Edwards, J.M., “Residual stresses in LENS® components using neutron diffraction and contour method”, *Material Science and Engineering A*, 399, 2005, 72–83.
  47. Bontha, S., Klingbeil, N.W., Kobryn, P.A., Fraser, H.L., “Thermal process maps for predicting solidification microstructure in laser fabrication of thin-wall structures”, *Journal of Materials Processing Technology*, 178, 2006, 135–142.
  48. Ahn, Y. K., Kim, H. G., Park, H. K., Kim, G. H., Jung, K. H., Lee, C. W., Kim, W. Y., Lim, S. H., Lee, B. S., “Mechanical and microstructural characteristics of commercial purity titanium implants fabricated by electron-beam additive manufacturing”, *Materials Letters*, 187, 2017, 64–67.
  49. Attar, H., Calin, M., Zhang, L.C., Scudino, S., Eckert, J., “Manufacture by selective laser melting and mechanical behavior of commercially pure titanium”, *Materials Science & Engineering A*, 593, 2014, 170–177.
  50. Furumoto, T., Koizumi, A., Alkahari, M. R., Anayama, R., Hosokawa, A., Tanaka, R., Ueda, T., “Permeability and strength of a porous metal structure fabricated by additive manufacturing”,

- Journal of Materials Processing Technology, 219, 2015, 10–16.
51. Kasperovich, G., Haubrich, J., Gussone, J., Requena, G., “Correlation between porosity and processing parameters in Ti6Al4V produced by selective laser melting”, *Materials and Design*, 105, 2016, 160-170.
  52. Qiu, C., Adkins, N. J. E., Attallah, M. M., “Microstructure and tensile properties of selectively laser-melted and of HIPed laser-melted Ti–6Al–4V”, *Materials Science & Engineering A*, 578, 2013, 230–239.
  53. Vrancken, B., Thijs, L., Kruth, J. P., Humbeeck, J. V., “Heat treatment of Ti6Al4V produced by selective laser melting: Microstructure and mechanical properties”, *Journal of Alloys and Compounds*, 541, 2012, 177–185.
  54. Leuders, S., Thöne, M., Riemer, A., Niendorf, T., Tröster, T., Richard, H. A., Maier, H. J., “On the mechanical behaviour of titanium alloy Ti6Al4V manufactured by selective laser melting: Fatigue resistance and crack growth performance”, *International Journal of Fatigue*, 48, 2013, 300–307.
  55. Uhlmann, E., Kersting, R., Klein, T. B., Cruz, M. F., Borille, A. V., “Additive manufacturing of titanium alloy for aircraft components”, *Procedia CIRP*, 35, 2015, 55–60.
  56. Tang, H. P., Qian, M., Liu, N., Zhang, X. Z., Yang, G. Y., Wang, J., “Effect of powder reuse times on additive manufacturing of Ti–6Al–4V by selective electron beam melting”, *Journal of the Minerals, Metals & Materials Society*, 67(3), 2015, 1-9.