

T.C.

TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ

MNT 524- HIZLANDIRICI TEKNOLOJİLERİ VS UYGULAMALARI

KATMANLI İMALATTA HIZLANDIRICI TEKNOLOJİLERİNİN KULLANIMI

Hazırlayan

DURUKAN TAMKAN 211517014

AZİZ AYBERK DELİKKULAK 161801022

ÇAĞDAŞ GÜVEN 151801013

Ders Hocası

Prof. Dr. SALEH SULTANSOY

Ankara

2021 Güz Dönemi

İÇİNDEKİLER

KATMANLI İMALATTA HIZLANDIRICI TEKNOLOJİLERİNİN KULLANIMI (DURUKAN TAMKAN)	1
1. GİRİŞ	1
2. ÜÇ BOYUTLU BASKI UYGULAMASININ GELİŞTİRİLMESİ	1
3. TOZ YATAK FÜZYON (POWDER BED FUSION) METHODU	3
3.1 Electron Beam Melting (EBM)	3
3.2 Selective Laser Sintering (SLS)	4
3.3 Selective Laser Melting (SLM), Direct Metal Laser Sintering (DMLS)	4
3.4 Multi Jet Fusion (MJF) by HP	4
4. METALLER İLE KATMANLI ÜRETİM	4
5. ELEKTRON HIZLANDIRICILARININ KATMANLI İMALATA ETKİSİ	4
6. SONUÇ	5
7. REFERANS	5

Seçici Elektron Demeti Eritmesi Tarafından Üretilen Titanyum-6 Alüminyum-4

Vanadyum Bileşenlerinde Ergime Stratejilerinin Kusur Popülasyonu Üzerindeki

Etkisinin X-ışını Bilgisayarlı Tomografi Analizi(AZİZ AYBERK DELİKKULAK)	6
1. Giriş	6
2. DeneySEL Yöntem	7
3. Sonuçlar	11
3.1 Arcam Elektron Işını Ayarları	11
4. Sonuçlar	16
5. Kaynakça	18
1. SİNKROTRON IŞIK KAYNAĞI (ÇAĞDAŞ GÜVEN)	19
1.1 PARLAKLIK	19
1.2 SİNKROTRON RADYASYONU	20
2. KATMANLI İMALAT	21
2.1 SLA	22
2.2 FDM	22
2.3 MJM	23
2.4 3DP	23
2.5 SLS	23
3. SİNKROTRON KARAKTERİZASYON	23

3.1 SPEKTROSKOPİ.....	23
3.2 GÖRÜNTÜLEME	24
3.3 LİTERATÜRDE KARAKTERİZASYON	25
3.4 MASAÜSTÜ SİNKROTRON TEKNOLOJİSİ	26
4. KAYNAKÇA	27

MNT524-2021

KATMANLI İMALATTA HIZLANDIRICI TEKNOLOJİLERİNİN KULLANIMI

Durukan Tamkan
TOBB ETU
Ankara

ABSTRACT

Hızlandırıcı teknolojileri pek çok alanda olduğu gibi üretim teknolojilerinde de yeni pek çok teknolojide lokomotif görevi görmektedir. Katmanlı üretim teknolojileri 1980'lerden itibaren hayatımıza girmiş ve geleneksel üretim doktrinlerini yıkmıştır. Bu zamandan beri basit prototipleme ve gösterim amacıyla kullanılan üç boyutlu basılmış parçalar, electron demeti eritmesi yönetiminin keşfedilmesiyle metal üretim parçalarında çığır açmış; savunma, havacılık, motor sporları ve medital protez sektörlerinde artık kendine yer bulmayı başarmıştır. Bu çalışmada katmanlı üretim tekniklerinin kısa bir özeti anlatılmış ve parçacık hızlandırıcı teknolojisiyle mümkün kılınan electron demeti kullanarak üç boyutlu baskı yapan tezgahların detayları anlatılacaktır.

Keywords: Hızlandırıcı teknolojileri, katmanlı imalat, üç boyutlu baskı,

1. GİRİŞ

Üç boyutlu baskı (3D baskı) olarak da bilinen Katmanlı Üretim (AM), onlarca yıldır çalışılmaktadır. Üç boyutlu bir baskı 1984 yılında 3D Systems Corp'tan Charles W.Hull tarafından icat edildi. Makinenin adı Steolithgraphy Apparatus [1]. O zamanlar teknoloji çok pahalıydı, bu nedenle ilk günlerde genel pazar için uygun değildi, ancak; 21. yüzyılın gelişimiyle birlikte, 3D yazıcıların birçok endüstriye girmesini sağlayan maliyetler önemli ölçüde azaldı.

Üç boyutlu yazıcı, standart bir mürekkep püskürtmeli yazıcı gibi çalışır. Bununla birlikte, üç boyutlu bir yazıcı, kağıda mürekkep katmanları yazdırmak yerine, bir 3B nesne oluşturmak için malzeme kullanır [2]. Katmanlı İmalat terimi, 3D baskı, katmanlı imalat, doğrudan dijital imalat (DDM), hızlı prototipleme (RP) ve eklemeli imalat gibi alt kümeleri içeren birçok teknolojiyi içerir.



FIGUR 1: Katmanlı imalat parça örnekleri

Katmanlı Üretim, birçok endüstride bazı niş ürünler yapmak için zaten kullanılıyor. Son zamanlarda, 3D baskı ve Eklemeli Üretim terimleri birbirinin yerine kullanılabilir. AM terimi, birbirini takip eden ince malzeme katmanlarının üst üste bindirilmesi ve nihai bir üç boyutlu ürün üretilmesi teknolojisidir. Her katman yaklaşık 0.0254 ve 2.54 mm kalınlığındadır [3].

Metaller, plastikler, kauçuklar, reçineler, cam, seramik ve beton gibi yaygın olarak kullanılan çeşitli malzemeler kullanılabilir [1]. Hızlı prototipleme teknolojisinin uygulanmasını ifade eder. Bu, pazara giriş ve inovasyonu artırmaya yardımcı olan Katmanlı Üretim için ilk uygulamadır. Bir parçayı hızlı prototipleme veya ürünü bitirme süreci olarak adlandırılabilir. Bu bölüm, seri üretim sürecinden önce ayrıca araştırılır/test edilir. Ticari 3D yazıcıların çoğu operasyonel olarak benzerdir.

2. ÜÇ BOYUTLU BASKI UYGULAMASININ GELİŞTİRİLMESİ

Üç boyutlu baskı (3D baskı) olarak da bilinen Katmanlı Üretim (AM), onlarca yıldır çalışılmaktadır. Üç boyutlu bir baskı 1984 yılında 3D Systems Corp'tan Charles W.Hull

tarafından icat edildi. Makinenin adı Steolithgraphy Apparatus [1]. O zamanlar teknoloji çok pahalıydı, bu nedenle ilk günlerde genel pazar için uygun değildi, ancak; 21. yüzyılın gelişiyle birlikte, 3D yazıcıların birçok endüstriye girmesini sağlayan maliyetler önemli ölçüde azaldı.

Üç boyutlu yazıcı, standart bir mürekkep püskürtmeli yazıcı gibi çalışır. Bununla birlikte, üç boyutlu bir yazıcı, kağıda mürekkep katmanları yazdırmak yerine, bir 3B nesne oluşturmak için malzeme kullanır [2]. Katmanlı İmalat terimi, 3D baskı, katmanlı imalat, doğrudan dijital imalat (DDM), hızlı prototipleme (RP) ve eklemeli imalat gibi alt kümeleri içeren birçok teknolojiyi içerir.

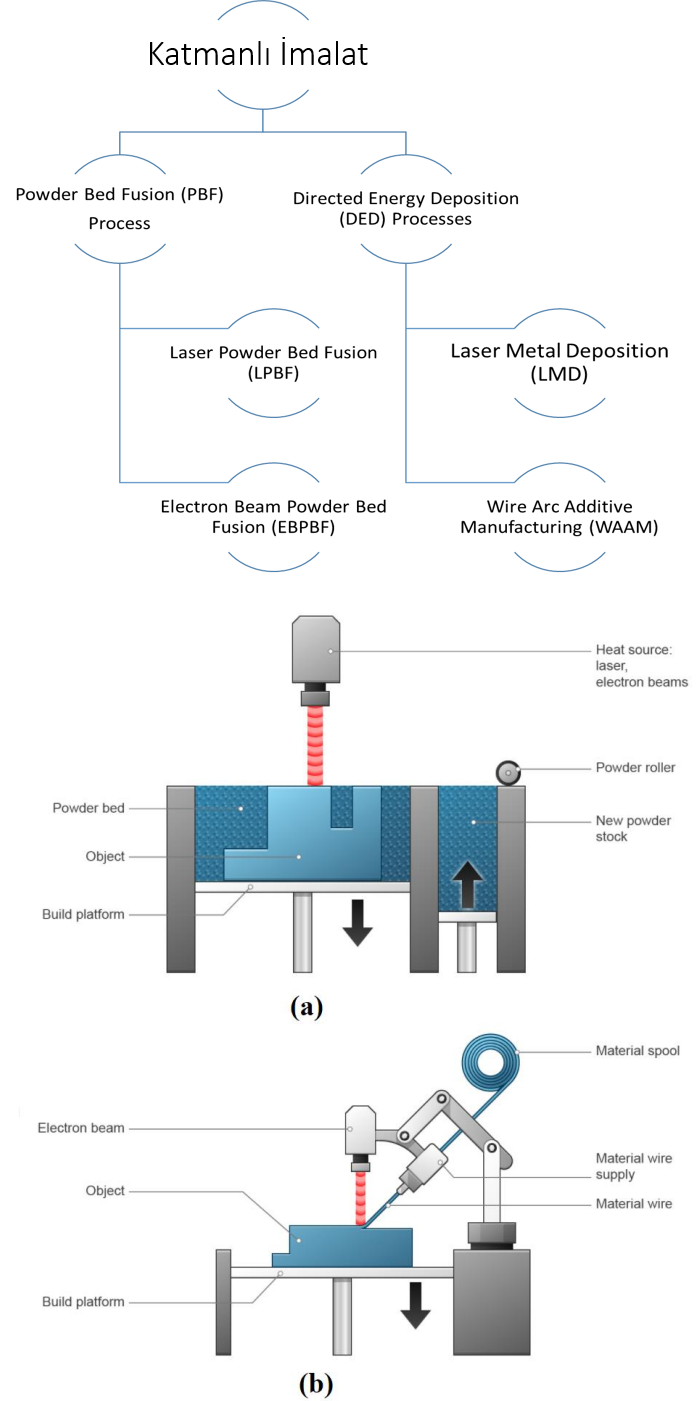
Katmanlı Üretim, birçok endüstride bazı niş ürünler yapmak için zaten kullanılıyor. Son zamanlarda, 3D baskı ve Eklemeli Üretim terimleri birbirinin yerine kullanılabilir. AM terimi, birbirini takip eden ince malzeme katmanlarının üst üste bindirilmesi ve nihai bir üç boyutlu ürün üretilmesi teknolojisidir. Her katman yaklaşık 0.0254 ve 2.54 mm kalınlığındadır[3].

Metaller, plastikler, kauçuklar, reçineler, cam, seramik ve beton gibi yaygın olarak kullanılan çeşitli malzemeler kullanılabilir [1]. Hızlı prototipleme teknolojisinin uygulanmasını ifade eder. Bu, pazara giriş ve inovasyonu artırmaya yardımcı olan Katmanlı Üretim için ilk uygulamadır. Bir parçayı hızlı prototipleme veya ürünü bitirme süreci olarak adlandırılabilir. Bu bölüm, seri üretim sürecinden önce ayrıca araştırılır/test edilir. Ticari 3D yazıcıların çoğu operasyonel olarak benzerdir.

Industry	Applications	Benefits
Aerospace	Fast Prototyping/Test projects	No Shape limitations
	Aeronautical Components	Reduce required workshop processes
	Weight reduction	Reduce assembly requirements
	High temperature Components	Space manufacturing for space stations
	Space Components	Local editing inside of the part Reduces cost and weight
Automotive	Fast Prototyping/Test projects	Reduce assembly requirements
	Automotive Components	Local editing inside of the part
	Weight reduction	Reduce Repair cost
	Heat Transfer components for cooling	Effect the shape overall of vehicles
		Reduces cost and weight Improve quality and manufacturing time
Machine Tool manufacturing	Fast Prototyping/Test projects	Lighter and fast manufacturing
	Reduce raw material volume	Quick responses to change and implementation
	Improve packaging	
Medical & Dental	Fast Prototyping/Test projects	Reduce operational time and cost
	Custom implants	Fast manufacturing and implementation
	Multimaterial organs , bones, body parts	Harmony with living cells through porous structure
	Teeth replacement with precision	Harmony of multimaterials for different purposes
	Orthodontic titanium components	
Civil Engineering/Construction	Fast Prototyping/Test projects	Mock up for review for customer needs
	Geometry precision on buildings	Short construction time
	Metallic Bridges and supports	Reduce weight and construction material
	Truss structures	Build temporary constructions fastly
	Metallic connection components	
Food	Mock up manufacturing	
	Chocolate cake and candy	Customization on shapes and images
	Coffee mug decoration	

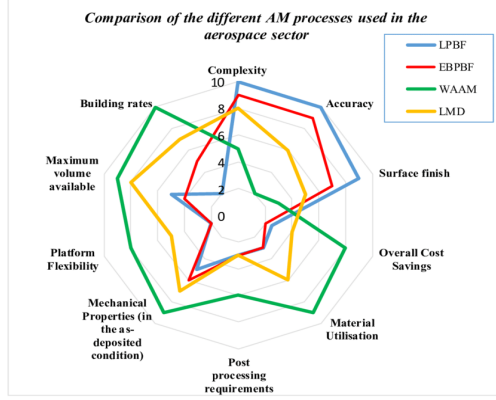
TABLO 1: Eklemeli üretim uygulamaları ve faydaları

Yazıcı, tasarımı üç boyutlu bir nesneye dönüştürmek için bilgisayar destekli bir tasarım (CAD) kullanır. Tasarım daha sonra z eksenine göre üç boyutlu yazıcıya malzeme katmanlarının nereye yerleştirileceğini söyleyen iki boyutlu birkaç bölüme bölünür. Toz Yatak Füzyon (Powder Bed Fusion) süreçleri ve Yönlendirilmiş Enerji Biriktirme (Directed Energy Deposition) süreçleri gibi iki tür Eklemeli Üretim vardır.



FIGUR 2: Powder Bed Fusion (a) ve Directed Energy Deposition (b) teknikleri

Toz Yatak Füzyon ve Yönlendirilmiş Enerji Biriktirme süreçleri, günümüz dünyasında iki ana metal katkılı üretim teknolojisidir ve her ikisi de iki ana alt teknolojiye ayrılmıştır.



Source	Method	Resolution	Deposition Rate	Power Efficiency	Coupling Efficiency	Cleanliness	Cost	Surface Finish	Total
Laser	Powder Bed	2	-1	-1	-1	0	-1	3	1
	Powder Blown	1	2	-1	-1	0	0	1	2
	Wire	0	2	-1	-1	-1	-1	0	-2
E-Beam	Powder Bed	0	1	2	2	2	-1	1	7
	Wire	-1	2	2	2	1	1	0	7
Arc	Wire	-1	3	2	2	-1	3	-1	7

TABLO 2: Çeşitli AM tekniklerinin karşılaştırılması

3. TOZ YATAK FÜZYON (POWDER BED FUSION) METODU

Çeşitli Toz Yatak Füzyon işlemleri vardır. En yaygın olanları aşağıda listelenmiştir;

- Direct Metal Laser Sintering (DMLS)
- Electron Beam Melting (EBM)
- Selective Heat Sintering (SHS)
- Selective Laser Melting (SLM)
- Selective Laser Sintering (SLS)

Powder Bed Fusion proses teknolojisi, tozları bir güç kaynağı (EBM veya Laser) yardımıyla eriterek parçalar üretir. İnşa düzleminde gerekli yayılan toz alanları bir güç kaynağı tarafından eritilir ve yeni bir toz tabakası yayılır. Bu işlem parça imal edilene kadar tekrarlanır. Toz hammadde olarak seramik,

plastik, cam veya metal alaşımları kullanılabilir. Paslanmaz çelik ve titanyum, sert öğütme özelliklerinden dolayı en popüler toz hammaddelerden ikisidir.

Elektron ışını toz yatağı biriktirme üretimi sırasında iki aşamalı ısıtma işlenir. İki aşamalı ısıtma, toz parçacıklarının yüklenmesini önler. Toz partikülleri ilk aşamada sinterlenmek üzere önceden ısıtılır ve ikinci aşamada partikülleri eritmek için ısı yoğunluğu artırılır. [4].

Bunu başarmak için bir bıçak ve bir silindir içeren farklı işlemler vardır. Yatağın altındaki bir hazne, taze malzeme sağlar. Seçici Laser Sinterleme makineleri, malzemeyi kaynaştırmak için bir ısı kaynağı, bu ısı kaynağını kontrol etmek için bir işlem ve öncekine göre yeni malzeme katmanları ekleyen bir mekanizma gibi üç bileşenden oluşur [35]. Doğrudan Metal Laser Sinterleme, Seçici Laser Sinterlemeye çok benzer. Bununla birlikte, plastik değil metal kullanır. Mekanizma, toz tabakasında katman katman sinterlenir. Seçici Isı Sinterleme, toz malzemeyi birbirine kaynaştırmak için ısıtılmış bir termal baskı kafasının kullanılmasıyla diğer işlemlerden farklıdır [35]. Ayrıca, SHS termoplastik tozları kullanır. Destek malzemesi olarak işlev görürler. Laser yerine termal baskı kafasının uygulanması, gerektiğinde ısı ve güç seviyelerini düşürme avantajına sahiptir. Seçici Laser Eritme genellikle Seçici Laser Sinterleme'den daha hızlıdır; inert bir gaz kullanması gerekir ve daha yüksek enerji gereksinimi vardır. Bu nedenle %10-20 arasında düşük enerji verimliliğine sahiptir [35].

Bazı metallerin ve polimerlerin kullanıldığı Toz Yatak Füzyon işlemi ile herhangi bir toz bazlı malzeme kullanılabilir:

SHS: Naylon,

DMLS, SLS ve SLM: Paslanmaz Çelik, Titanyum, Alüminyum, Kobalt Krom ve Çelik,

EBM: Titanyum, Kobalt Krom, Paslanmaz Çelik, Alüminyum ve Bakır.

Kısaca Powder Bed Fusion avantajlarından bahsetmek gerekirse; nispeten pahalı değildir. Görsel modeller ve prototipler için kullanılabilir. Ayrıca entegre destek yapısı üzerine de uygulanabilir. Dezavantajları: nispeten yavaş hız, özellikle SHS; boyut sınırlamaları ve yüksek güç kullanımıdır; son olarak, malzemede yapısal özelliklerden yoksundur.

3.1 Electron Beam Melting (EBM)

EBM 3D baskı teknolojisi, yüksek enerjili bir elektron ışını kullanımıyla füzyona ulaşır ve daha az bozulma ile sonuçlanan daha az kalıntı gerilimi üretir. Daha az enerji kullanır ve SLS'den daha hızlı katmanlar üretebilir. Bu yöntem en çok havacılık ve savunma, motor sporları ve tıbbi protezler gibi yüksek değerli endüstrilerde kullanışlıdır.

. Laser ile karşılaştırıldığında, toz yatak biriktirme tekniği ile elektron ışını seçici eritme daha büyük avantajlara sahiptir:

-Elektron ışını, elektromanyetik ışık dalgasına kıyasla üretim sürecinde hassasiyeti artıran daha küçük çaplı odaklanmış ısı sağlayabilir.

-Elektron ışını elektrik tüketimi lazere göre çok düşüktür ve ışın üretme verimi çok yüksektir.

-İş parçası üzerindeki ısı transfer oranları/ışın bağlantısı veya toz malzeme verimliliği lazere göre daha iyidir.

-Işının odak konumu ve gücü herhangi bir hareketli mekanizma olmadan kontrol edilebilir.

-Elektron ışını işlem için oksijene ihtiyaç duymaz, bu nedenle temiz ortam sağlayan vakumda çalışabilme özelliğine sahiptir.

- Elektron ışınli yazıcılar ilk yatırımında pahalı olsa da, hammadde ve elektrik tüketimi açısından işletmesi daha ucuzdur.

Toz yatağı biriktirme, tozların iyi kullanımını, hassasiyet ve yüzey bitirme, yüksek çıkıntı açısı, çok karmaşık şekiller oluşturma yeteneği sağlar. Ancak düşük yapı oranları, düz taban gereksinimi ve düşük yapı hacmi gibi dezavantajları vardır.

3.2 Selective Laser Sintering (SLS)

SLS 3D baskı teknolojisi, 1980'lerin sonlarında Austin'deki Texas Üniversitesi'nde ortaya çıktı. Yıllar geçtikçe, bu teknoloji dikkate değer gelişmeler yaşadı. Temel olarak süreç, katı bir yapı oluşturmak için toz halindeki malzemeyi katman katman sinterlemek veya birleştirmek için lazerleri kullanır. Gevşek tozla kaplanan nihai ürün daha sonra fırçalar ve basınçlı hava ile temizlenir. SLS 3D baskı işleminde kullanılan ana malzemeler arasında poliamid (Naylon), Alümid (gri alüminyum tozu ve poliamid karışımı) ve kauçuk benzeri malzemeler bulunur. Naylon çoraplar güçlü ve dayanıklıdır ancak bir miktar esnekliğe sahiptirler, bu da onları geçmeli oturmalar, braketler, klipsler ve yay özellikleri için mükemmel kılar. Tasarımcılar, kavramsal aşamada ince parçaların büzülme ve eğilme duyarlılığını dikkate almalıdır.

3.3 Selective Laser Melting (SLM), Direct Metal Laser Sintering (DMLS)

Aynı teknik ilke, Seçici Lazer Eritme (SLM) ve Doğrudan Metal Lazer Sinterleme (DMLS) parçaları üretmek için kullanılır, ancak yalnızca metal parçalar üretmek için kullanılır. SLM, alüminyum gibi tek bileşenli metallerin hafif, güçlü yedek parçalar ve prototipler oluşturmak için kullanılabilmesi için tozun tamamen erimesini sağlar. DMLS, tozları sinterler ve titanyum bazlı alaşımlar dahil olmak üzere alaşımlarla sınırlıdır. Bu yöntemler, yüksek kalıntı gerilimi telafi etmek ve bozulma oluşumunu sınırlamak için ek destek gerektirir. Uygulamalar arasında kuyumculuk ve dişçilik endüstrileri, yedek parçalar ve prototipler bulunur.

3.4 Multi Jet Fusion (MJF) by HP

Multi Jet Fusion (MJF) 3D baskı tekniği, daha sonra elementleri katı bir tabaka halinde ısıtarak kaynaştırılan eritme ve detaylandırma ajanlarını uygulamak için bir mürekkep püskürtmeli dizisinin kullanılmasıyla yukarıda bahsedilen yöntemlerden farklıdır. Hiçbir lazer dahil değildir. Detaylandırma ajanları, parça çözünürlüğünü iyileştirmek için konturların etrafına püskürtülür ve böylece gerçekçi nesne üretimi olasılığını açar.

4 METALLER İLE KATMANLI ÜRETİM

Eklemeli imalat (AM), patent değerinin yayınlanması ile son on yılda piyasa değerini artırmaktadır. Hem amatör hem de profesyonel olarak farklı sektörlerde değerini sürekli artırmaktadır. Popülarite, farklı malzeme ve proseslerde teknolojinin gelişmesiyle her geçen gün artmaktadır. Hem iç hem de dış yapı elemanlarında tasarım sürecinde birçok imalat kısıtlamasını ortadan kaldırır ve tasarımcılara birçok açıdan özgürlük verir. Bu özgürlük, bileşenlerin geometrisini optimize ederken ve mekanik özellikleri iyileştirirken şekil üzerinde daha büyük fırsatlar sağlar.

Yukarıda bahsedilen bu imkanlara ek olarak imalathaneler arası tüm imalat süreçlerini, işçiliği ve nakliyyeyi de ortadan kaldırmaktadır. Sadece tek bir tuşa basarak yapısal parça üretme imkanı verir. Bu potansiyel, daha geniş bir mühendislik uygulamaları yelpazesi için AM kullanımını daha da artıracaktır.

AM'nin hayatımıza kattığı benzersiz yeteneklerden biri de dolgu yapılarıdır. Dolgu, diğer bir deyişle katılık oranı, geometri içinde yer kaplamak için kullanılan tekrarlayan bir yapıdır. Belirlenen yüzde ve desende ekstrüde edilir ve hammadde tasarrufu ile parça bütünlüğünü sağlar.

Eklemeli üretim (AM), kısmen/tamamen erimiş toz katmanları, metal teller ve şeritler ile bileşenler üretir. Hammaddeler füzyon (elektron ışını, lazer ve elektrik arkı), katı hal (ultrasonik, soğuk konsolidasyon) veya başka herhangi bir odaklanmış ısı kaynağı ile eritilir. Eklemeli imalat malzemesi besleme yöntemlerini esas olarak toz yatağı, toz üfleme ve tel olmak üzere üçe ayırabiliriz.

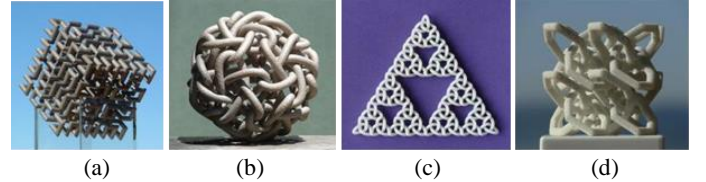


FIGURE 2: Kompleks katmanlı üretim parçaları (a) Hilbert küpü (b) Dodeca-Pentafoil, (c) Recursive trefoil knot (d) Hücresel yapılar

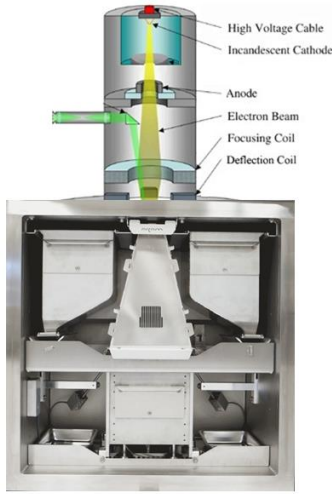
5 ELEKTRON HIZLANDIRICILARININ KATMANLI İMALATA ETKİSİ

Elektron demeti eritici başlık teknolojisi sayesinde metal üç boyutlu baskı teknolojileri daha güvenilir ve kullanılabilir bir teknoloji haline gelmiştir. Elektron demeti eritici başlık sayesinde üretim kabiliyetleri çok zor olan titanyum malzeme kolayca işlenebilir hale getirilmiş, karmaşık tasarımların önü açılarak üretim sürelerinde çok büyük iyileştirmeler sağlanmıştır.

Katmanlı imalat tablasında titanyumun eritilmesini sağlayan elektron demeti başlığın çalışma süreci aşağıdaki gibidir:

- Elektron başlığı (katot) yüklü elektronları yaratır. Elektron anoda doğru hareket ederler.

- Anot Elektronları ivmelendirerek elektron jeti oluşmasını sağlar ve bu elektronlar manyetik lensler boyunca hareket ederler.
- Manyetik lensler düşük enerjili elektronları elimine eden sıralı lensler bütünüdür. Aynı zamanda dağılan elektronların da geçmesini engelleyerek yüksek yoğunluklu elektron demeti oluşmasını sağlarlar.
- Yönlendirici bobin ise elektron demetini düzenleyerek, demetin istenilen bölgeye odaklanmasını sağlarlar.
- Elektron demeti, elektronların hava parçacıklarına çarparak enerji kaybetmesini engellemek için vakum bir ortamdan geçer.
- Son olarak yüksek enerjili elektron demeti kinetik enerjisini çarpışma sonrası ısı enerjisine çevirerek metal tozu üzerinde erime ve kaynaşma sağlar.



FIGUR 3: EBM yazıcının kesiti

Endüstri uygulamalarına bakıldığında 60KeV-200KeV beam gücü değerlerine erişmiş 100-200 μm çapında demet üretebilen pek çok ticari katmanlı üretim tezgahlarının üretildiğini görmekteyiz. Başta Amerika, Almanya, Birleşik Krallık, Japonya ve Fransa’da bulunan ana sağlayıcılar olmak üzere Kore, Rusya, İsveç gibi gelişmiş ülkelerin tamamında yaygın ve erişilebilir bir teknoloji haline gelmiştir.

6 SONUÇ

Katmanlı imalat teknolojileri geleceğin üretim teknolojileri olarak görülmekte ve geleneksel üretim tekniklerinin gelecek 20 yıl içerisinde yerini alması öngörülmektedir. Pek çok malzeme ile üretim sağlasa da lokomotif sektörler olan havacılık, savunma sanayii, motor sproları ve medikal protez uygulamalarında kullanılması parçacık hızlandırıcı teknolojileri ile doğrudan ilgili olan electron demeti eritme teknolojisi ile mümkün kılınmıştır. Bu teknoloji sayesinde katmanlı imalat parçaları güvenilirlik kazanarak belirli bir standartta üretilmiştir. Gelecek teknolojilerinin geliştirilmesi, malzeme biliminin ilerlemesi ve gurur duyulan ürünlerin yapılabilmesi için hızlandırıcı teknolojilerine gereken önemin verilmesi elzemdir.

REFERENCES

- [1] Bogue, R. (2013). 3-D printing: The dawn of a new era. *Manufacturing Assembly Automation*, 33(4), 307—311.
- [2] Berman, B. (2012). 3-D printing: The new industrial revolution. *Business Horizons*, 55(2), 155—162.
- [3] Wohlers Associates Inc. (2013). *Wohlers report*. Fort Collins, CO: Wohlers.
- [4] Powder Bed Fusion: Additive Manufacturing Research Group: Loughborough University (2019), Retrieved from <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/powderbedfusion/>

Seçici Elektron Demeti Eritmesi Tarafından Üretilen Titanyum-6 Alüminyum-4 Vanadyum Bileşenlerinde Ergime Stratejilerinin Kusur Popülasyonu Üzerindeki Etkisinin X-ışını Bilgisayarlı Tomografi Analizi

Aziz Ayberk Delikkulak

1. Giriş

Katmanlı Üretim (AM), 2B dilimlerden bir bileşen oluşturmak için odaklanmış bir ısı kaynağı kullanılarak malzemenin ardışık katmanlarda biriktirildiği ve konsolide edildiği bir teknoloji ailesini tanımlar. AM teknikleri, kapsamlı işleme olmaksızın doğrudan bilgisayar destekli tasarımlardan topografik olarak optimize edilmiş geometrilerle daha yüksek verimli tasarımlar üretme kabiliyeti sunar. İlgili daha kısa teslim süreleri, yüksek malzeme kullanım oranları ve azaltılmış takım maliyetleri ile birleştirildiğinde, bu, biyomedikal ve havacılık endüstrilerinde düşük hacimli üretim için çekici bir tekliftir.[1][2][3] Seçici Elektron Işını Eritme (SEBM), yüksek değerli titanyum bileşenlerin neredeyse-şekilli üretimi için umut verici bir toz yataklı AM tekniğidir. Şu anda tek ticari tedarikçi olan Arcam AB tarafından geliştirilen SEBM sistemi, öncül toz katmanlarını eritmek için yeterli enerjiye sahip elektromanyetik lensler tarafından odaklanan hızlı bir şekilde taranan bir ışın kullanır. Bu sistem tipik olarak, önce her 2B bölümün ana hatlarını eritmek ve ardından ışını bölüm sınırı içinde tarama yaptırarak ana hattı "doldurmak" için iki ana tarama stratejisini (sırasıyla kontur oluşturma ve tarama olarak adlandırılır) kullanır. Diğer AM sistemlerinin çoğundan farklı olarak, SEBM işleme yüksek bir sıcaklıkta gerçekleşir. Bunun faydalı bir etkisi, çökeltile malzemede daha düşük artık gerilmelerle sonuçlanmasıdır.[1] Ayrıca, parçalar kontrollü bir vakum altında inşa edilir, bu da lazer bazlı toz yatak tekniklerine göre gözeneklilik seviyesini azaltır ve %99,8'den fazla yoğunlukların elde edilmesini sağlar. SEBM ile, standart metalografi kullanılarak, genellikle gaz gözeneklerinin rastgele dağıldığı varsayılmıştır. Ti-6Al-4V'nin doğrudan metal birikimi üzerine yapılan çalışmalar, tedarik edilen toz granüllerdeki gaz gözeneklerinin hacim oranının gözeneklerin nihai hacim oranını etkilemesine rağmen, lazer gücü gibi diğer faktörlerin daha önemli olduğunu bulmuştur. Işın hızı arttıkça füzyon kusurlarının daha yaygın hale geldiği bildirilmiştir. SEBM'de hem gaz gözenekleri hem de füzyon eksikliğinden kaynaklananlar gözlenmiştir. Son modelleme çalışması, yetersiz enerji girişi varsa AM'de büyük tünel kusurlarının da üretilebileceğini göstermiştir. Bununla birlikte, optimize edilmiş parametrelerle üretilen parçalarda, ölümcül yorulma çatlaklarının esas olarak yüzeye yakın gaz gözeneklerinde başladığı rapor edilmiştir. Bunun nedeni muhtemelen biriken malzemedeki daha yüksek frekansları ve dolayısıyla daha yuvarlak morfolojileri, daha düzensiz füzyon gözenekleri eksikliğinden daha düşük bir stres konsantrasyonu üreteceğinden, yüzeye yakın konumlanma

şanslarının daha yüksek olması olabilir. Bu nedenle, bu çalışmanın amacı, AM'de SEBM süreci ile kusur-süreç ilişkilerinin var olan temel anlayış eksikliğini ele almaktır. Bu amaca ulaşmak için, titanyum test numunelerinde bulunan gözeneklerin üç boyutlu uzayda boyutunu, morfolojisini, frekansını ve dağılımını ölçmek için X-ışını Bilgisayarlı Tomografiyi (XCT) kapsamlı bir şekilde kullanıldı. Bu, daha önce mümkün olandan çok daha ayrıntılı bilgilerle istatistiksel olarak geçerli sonuçların elde edilmesini sağlamıştır. Farklı çözünürlüklere sahip XCT sistemlerini kullanarak, gözeneklerin gerçek boyutlarını ve morfolojilerini ölçmenin yanı sıra, ışın tarama stratejilerine tam boyuttaki gözeneklerin konumunu ölçmek mümkün olmuştur. Bu, SEBM sürecindeki inşa döngüsü ile ilgili olarak, farklı türdeki kusurların kaynağı ve bunların konumu hakkında değerli bilgiler edinilmesine olanak sağlamıştır.

İşlenmemiş toz ayrıca AM'deki gözenekliliğin toz besleme stoğundaki gaz kontaminasyonu ile ilişkili olabileceği teorisini destekleyen kanıtlar için incelenmiştir. Birim hacim başına uygulanan enerji yoğunluğu (E_a), farklı proses parametrelerinin etkisini karşılaştırmak için sıklıkla seçici lazer eritmede kullanılan bir parametredir. Aynı anda değişen ışın hızı, güç ve eriyik yolları arasındaki ofset ile ilgili olarak birim hacim başına yerel ısı girdisini tanımlar. Bu nedenle, bu parametre, farklı örneklerin yanı sıra bir yapı içindeki ayrı konumları karşılaştırmak için kullanışlıdır ve şu şekilde verilir:

$$E_s = \frac{P}{v \cdot h \cdot t} \text{ (J} \cdot \text{mm}^{-3}\text{)} \quad \text{Denklem (1)}$$

burada: P , v , h ve t sırasıyla ışın gücü (W), ışın hızı ($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$), çizgi ofseti (mm) (eriyik izleri arasındaki boşluk) ve katman kalınlığıdır (mm). Unutulmamalıdır ki, Denk. (1) iş parçasıyla eşleşmeyi ihmal ettiği için net enerji girdisi olarak görülmemelidir, ancak farklı proses ayarları arasındaki nispi enerji girdisini kıyaslamak için faydalı bir parametredir. Arcam makinesini kullanan SEBM ile, işlem sırasında sabit bir voltaj (60 kV) korunur, böylece güç ($P = \text{akım} \times \text{voltaj}$) yalnızca ışın akımı (I) ile orantılıdır.

2. DeneySEL Yöntem

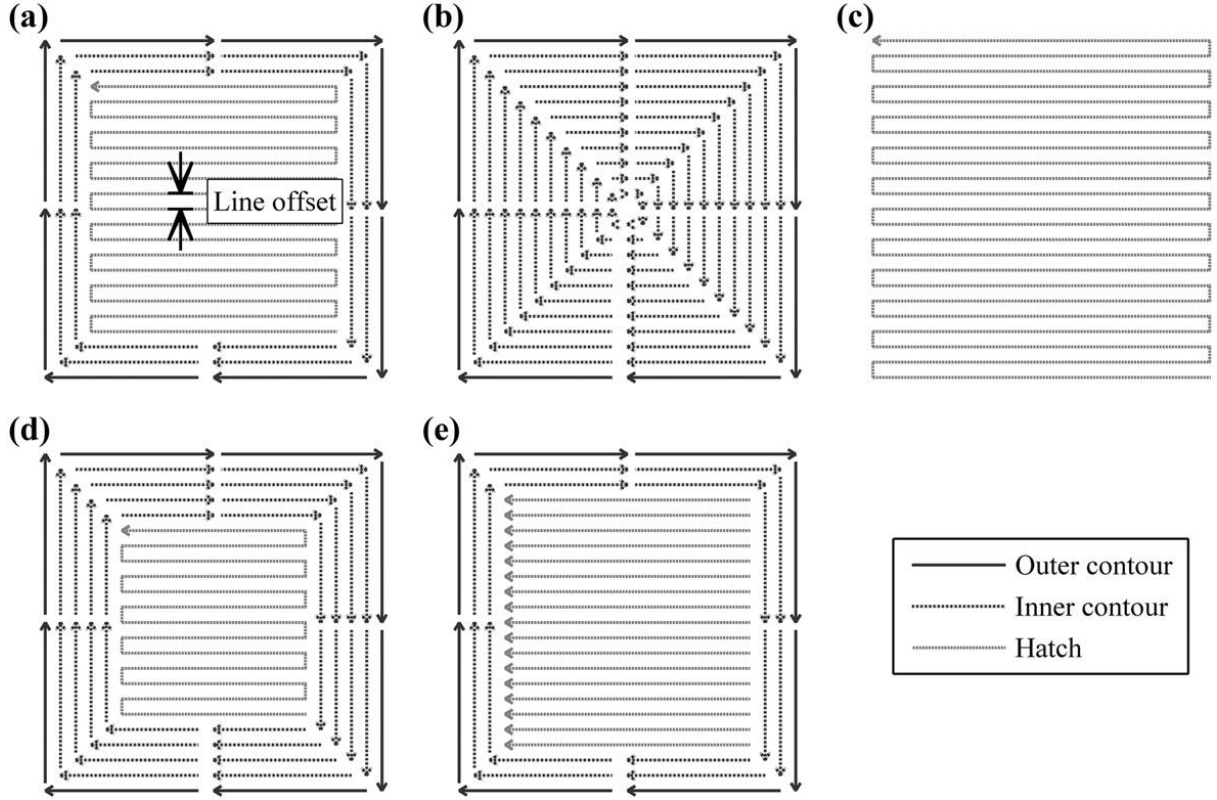
Bu çalışmada analiz edilen numuneler, Sheffield Üniversitesi'nde bir Arcam S12 SEBMmachine'de yapılmıştır. SEBM makinesi, kontrol yazılımının en son yayınlanan sürümüyle (EBMControl 3.2 Service Pack 2) yapılandırıldı ve baştan sona standart önerilen Arcam işletim prosedürleri kullanıldı. Besleme stoğu, Arcam tarafından sağlanan Ti-6Al-4V ön alaşımlı plazma atomize tozdan oluşuyordu ve partikül boyutları 45 ile 100 μm arasında değişiyordu.

Ticari olarak uygun bir işlemde olduğu gibi, bu çalışmada kullanılan tüm toz, Al-Bermani ve diğerleri tarafından açıklanan prosedür izlenerek geri dönüştürülmüştür. Biriktirmeden önce, yapı odası helyum ile doldurularak kontrollü bir vakuma alındı. İlk toz tabakası, elektron ışını ile 730 °C'ye (varsayılan Arcam ayarı) önceden ısıtılmış paslanmaz çelik bir taban plakası üzerine yerleştirildi. Taban plakası sıcaklığı, her yapı boyunca bir termokupl ile kaydedildi. Bu çalışmadaki tüm numuneler için 210 mm kare 10 mm kalınlığında bir taban plakası kullanıldı. Her katmanı eritmeden önce, toz önceden ısıtıldı ve hedef yapı sıcaklığını (730 °C) korumak ve daha yüksek enerji yoğunluklu eritme aşaması sırasında tozun yüklenmesini azaltmak için kiriş hızla taranarak sinte edildi. Ön ısıtma aşaması için yine standart Arcam parametreleri kullanıldı. Bu, ön ısıtma I'in tüm yatağı taradığı ve Ön Isıtma 2'nin daha sonra yalnızca eritilecek alanları ön taradığı, odaklanmamış bir ışınla ardışık iki adımı içeriyordu. Standart yapı dizisinde bunu, daha konsantre bir ışın kullanan ve iki ayrı ışın rasterleştirme stratejisi kullanan eritme aşaması takip eder (Şekil 1a). Eritme aşamasında, öncelikle her 2B kesit diliminin ana hatlarını eritmek için kesit kenarından başlayıp içe doğru hareket eden üç “kontur” geçişi kullanılır. Kontur stratejisi (buradan itibaren konturlama olarak anılacaktır), aynı anda birkaç ayrı eriyik havuzunu aktif tutmak için ışını hızla hareket ettiren, MultiBeam olarak bilinen bir teknolojiyi kullanır. MultiBeam ayarlarının bir sonucu olarak, dış kontur sırasında 50 ve iç konturlar sırasında 10 eriyik havuzu mevcuttur. Dış kontur geçişinde her bir eriyik havuzu, içteki ikisine göre daha yavaş ve daha düşük bir güçle çevrilir (ayrıntılar için Tablo 2'ye bakın). Daha sonra her bölümün merkezi, ışının rasterleştirilmesiyle "doldurma" olarak bilinen bir "yılan" eritme stratejisiyle "doldurulur" (yani sürekli bir yol ile ileri ve geri ışın hareketi ile). Daha sonra doğru katman yüksekliğini elde etmek için aşama 70 µm aşağı doğru artırılır ve bir sonraki toz katmanı haznelerden dağıtılır ve bir tırmıkla yayılır. Tarama yönü, her katman arasında 90° döndürülmüştür. Tarama sırasında ışın akımı doğrudan operatör tarafından ayarlanmaz, bunun yerine EBM kontrol yazılımı tarafından hesaplanır ve daha küçük eriyik uzunluklarının daha düşük akıma sahip olacağı şekilde tarama hattının uzunluğu ile doğrusal olarak değiştirilir. Akım kararlaştırıldıktan sonra, yaklaşık olarak sabit bir eriyik oranı oranını koruyarak bir sabit eriyik havuz derinliğini korumaya çalışmak için bir "hız fonksiyonu" kullanılır. Akım kararlaştırıldıktan sonra, yaklaşık olarak sabit bir P/v oranını (I/v ile orantılı) koruyarak sabit bir eriyik havuz derinliğini korumaya çalışmak için bir "hız fonksiyonu" kullanılır. Tarama yönü tersine döndüğünde, bir "dönme işlevi", halihazırda sıcak olan ve yakın zamanda eriyen alanın aşırı ısınmasını önlemek için ışın hızını otomatik olarak artırır. Işın odağı ayrıca bir odak ofseti aracılığıyla da ayarlanır. Bu durumda standart prosedür, huzmeyi konturlama sırasında en odaklanmış durumda kullanmak (0 mA odak sapması) ve ardından

tarama için hafifçe odaktan uzaklaştırmaktır (19 mA odak sapması). Akım belirlendikten sonra, yaklaşık olarak sabit bir P/v oranını (I/v ile orantılı) koruyarak sabit bir eriyik havuz derinliğini korumaya çalışmak için bir "hız fonksiyonu" kullanılır. Tarama yönü tersine döndüğünde, bir "dönme işlevi", halihazırda sıcak olan ve yakın zamanda eriyen alanın aşırı ısınmasını önlemek için ışın hızını otomatik olarak artırır. Işın odağı ayrıca bir odak ofseti aracılığıyla da ayarlanır. Bu durumda standart prosedür, huzmeyi konturlama sırasında en odaklanmış durumda kullanmak (0 mA odak sapması) ve ardından tarama için hafifçe odaktan uzaklaştırmaktır (19 mA odak sapması). Proses parametrelerinin gözeneklilik seviyeleri üzerindeki etkisini sistematik olarak incelemek için, Şekil 2a'da tanımlanan geometriye sahip basit küboid numuneler doğrudan taban plakası üzerinde üretildi. Küboidler, ortogonal tarama yönleri (x & y) dış yüzleri ile hizalanacak şekilde yapı odasında yönlendirildi. Eritme sırasında numuneler, termal etkileşimi en aza indirmek için her model arasında 30 mm olacak şekilde düzenlenmiştir (her parçayı termal olarak izole etmek için diğer çalışmalarda kullanılan önemli ölçüde daha fazla. Bireysel kontur ve tarama stratejilerinin uygulanmasının değiştirilmesinin etkisini incelemek için bir numune seti üretmek için bir yapı döngüsü kullanıldı (Tablo 2 C0–C7 ve Şekil 2b–e'de ayrıntılı olarak verilmiştir).

Tablo 1 : Küboid şekilli numuneler ile araştırılan standart Arcam eriyik proseslerindeki tüm değişiklikler için numune tanımlama kodları. Belirtilenler dışındaki tüm ayarlar Arcam varsayılan değerlerinde sabit tutulmuştur.

Sample ID	Modification
C0	Standard settings (control)
C1	Contouring only
C2	Hatching only
C3	5 contours
C4	Contour inner to outer
C5	Hatch first
C6	Turning function disabled
C7	Single direction hatching
S0	Speed function 36 (control)
S1	Speed function 30
S2	Speed function 18
S3	Speed function 12
L0	Line offset 0.2 mm (control)
L1	Line offset 0.15 mm
L2	Line offset 0.1 mm
F0	Focus offset 19 (control)
F1	Focus offset 12
F2	Focus offset 6
F3	Focus offset 0



Şekil 1 : Arcam SEBM Makinesi tarafından kullanılan standart eriyik stratejisinin ve yapılan deneylerde kullanılanların şematik diyagramları.

Daha sonra tarama geçişleri (L0–L2), hız fonksiyonu (S0–S3) ve odak ofseti (F0–F3) arasındaki çizgi ofsetinin etkisini, tüm diğer parametreler sabit tutularak sistematik olarak incelemek için daha fazla inşa döngüleri gerçekleştirildi. bkz. Tablo 2. Her yapıyı takiben, kullanılan ışın hızları ve akımlar, otomatik olarak oluşturulan günlük dosyalarından çıkarıldı. Test parçalarının imalatının ardından, numunelerin her birindeki kusur popülasyonu, Manchester Üniversitesi'ndeki Henry Moseley X-ray Görüntüleme tesisinde XCT ile analiz edildi. Makro ölçekli taramalar ilk olarak bir Nikon Metrology 225/320 kV Custom Bay makinesi kullanılarak yapıldı. Bu taramalar x-y düzleminin tüm enine kesitini yakaladı, ancak üst ve alt yüzeylerden kenar etkilerinden kaçınmak için her numunenin yalnızca merkezi 16 mm'si (z olarak) görüntülendi. Daha yüksek çözünürlük elde etmek için, numune C0'dan küçük numuneler de işlendi. Yaklaşık 1,75 mm x ve y boyutlarına sahip numuneler hem kenardan (HREDge olarak adlandırılır) hem de merkezden (HR Merkezi) kesildi. Bu küçük numunelerin yüksek çözünürlüklü analizi, ince duvarlı bir poliimid tüp içinde bulunan bir öncü toz numunesini karakterize etmek için de kullanılan bir Zeiss Xradia Versa 500 sistemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu enstrümanlar için tam ayarlar **Tablo 3**'te verilmiştir.

Imaged sample size (mm)	Sample description	XCT system	Accelerating voltage (kV)	Power (W)	Exposure (ms)	Projections	Voxel size (µm)	Minimum detectable pore equiv. dia. (µm)
10 × 10 × 16	Whole samples	Custom Bay	160	17.6	1415	3143	9.9	24.6
1.75 × 1.75 × 1.75	Machined small regions	Versa 500	100	9.0	1000	1601	2.1	5.2
1.75 diameter	Powder	Versa 500	80	7.0	1000	1601	2.1	5.2

Tablo 3 : XCT verilerini almak için kullanılan cihaz ve ayarlar.

3B veriler, filtrelenmiş bir geri projeksiyon algoritması kullanılarak 2B radyograflardan yeniden oluşturuldu. Veriler, Otsumethod tarafından segmentasyonlu Avizo Fire 8 yazılımı kullanılarak analiz edildi. Hacim, boyut (aynı hacme sahip bir kürenin çapı olarak tanımlanan eşdeğer küresel çap), en boy oranı (AR), yönelim ve uzamsal dağılım açısından gözenekliliği karakterize etmek için analiz yapıldı. Tomografi verileri ayrıca x-y ve x-z düzlemlerinde 2D numune bölümlerinden geleneksel optik mikroskopi ile yapılan ölçümlerle karşılaştırıldı. Silisyum karbür bıçakla kesmenin ardından, numuneler bir oksit parlatma süspansiyonu ile son cilalamadan önce silikon karbür aşındırıcı zımpara kağıtları (P180 ila P4000) kullanılarak metalografik olarak hazırlandı. Daha sonra, bir Keyence konfokal mikroskobu almak ve ardından parlatılmış dağlanmamış yüzeylerin 99 görüntüsünü 10 kez büyütmede birleştirmek için kullanıldı. Gözenekler, Otsu yöntemi ile hesaplanan bir değerle eşiklemeden sonra MATLAB'da ölçülmüştür. Ek olarak, bir FEI Magellan Yüksek Çözünürlüklü Taramalı Elektron Mikroskobu ile elde edilen geri saçılmış elektron görüntüleri kullanılarak gözenek morfolojilerinin niteliksel bir analizi gerçekleştirilmiştir.

3. Sonuçlar

3.1 Arcam Elektron Işını Ayarları

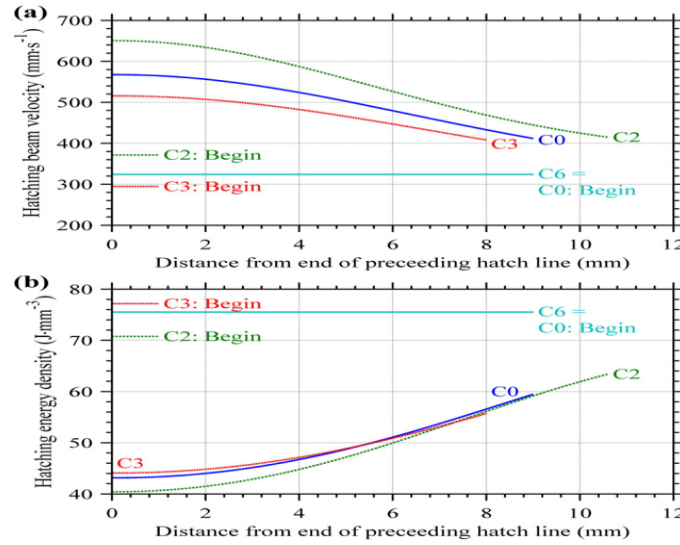
Arcam makine proses ayarlarının değiştirilmesinin her numuneye iletilen enerji yoğunluğu üzerindeki etkisini anlamak önemlidir. Arcam sistemini kullanırken, işlem ayarlarına dayalı olarak tescilli kontrol yazılımı tarafından dinamik olarak hesaplandığından ışın demeti akımı ve hızı doğrudan değiştirmek mümkün değildir. Tüm numuneler için, şekillendirme ışını akımı ve hızı, kontrol sistemi tarafından ayarlanmaz ve standart değerlerden sapma göstermez (bkz. Tablo 1).

Tablo 2 : Standart ayarlar ve parametre değişikliği ile farklı numuneler için Arcam makinesi tarafından kullanılan elektron ışını ayarları (bkz. Tablo 1). Her durumda E_a karşılık gelen uygulanan enerji yoğunluğu Denklem (1) ile hesaplanmıştır.

Process	Sample numbers	Melt length (mm)	v (begin) ($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	I (mA)	Line offset (mm)	E_a (begin) ($\text{J} \cdot \text{mm}^{-3}$)	E_a (average) ($\text{J} \cdot \text{mm}^{-3}$)
Outer contour	All	10	280.0	5.0	0.30	51.0	51.0
Inner contour	All	9.5 & 9 (8.5 & 8 for C3 only)	700.0	12.0	0.25	58.8	58.8
Hatch	C0, C4, C5, F0, F1, F2, F3, S0, L0	9	324.3	5.7	0.20	75.5	48.4
	C2	10.6	371.7	6.1	0.20	70.8	48.4
	C3	8	294.7	5.3	0.20	77.2	47.8
	C6, C7	9	324.3	5.7	0.20	75.5	75.5
	S1	9	254.6	5.7	0.20	96.1	59.4
	S2	9	185.3	5.7	0.20	132.1	78.9
	S3	9	115.9	5.7	0.20	211.2	122.9
	L1	9	327.0	5.7	0.15	100.5	64.6
	L2	9	327.0	5.7	0.10	150.8	96.9

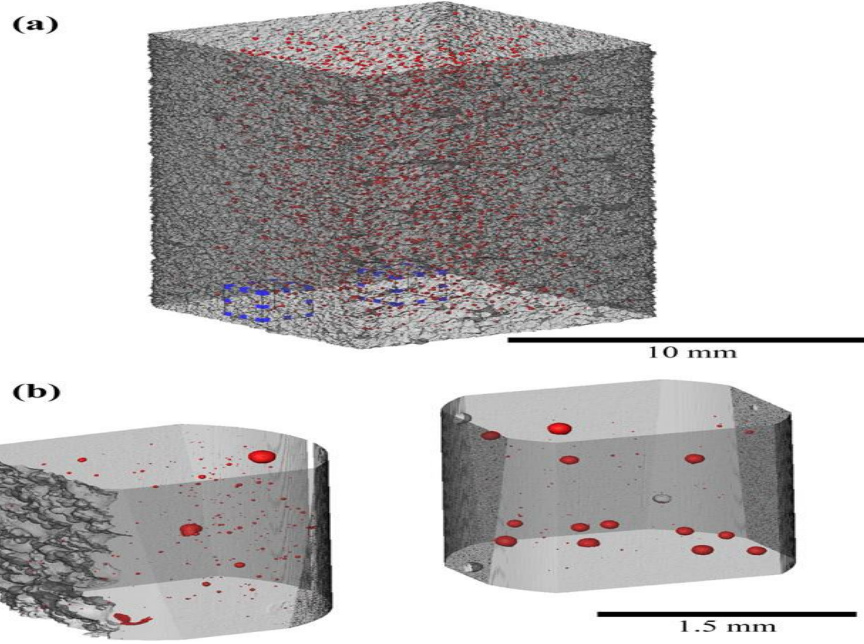
Buna karşılık, C1-C7 numunelerinde kullanılan bazı işlem modifikasyonları, kuluçka için kullanılan enerji yoğunluğunda değişikliklere neden oldu. Her katmandaki her tarama eritme stratejisinin başlangıcında, kontrol sistemi ilk olarak tarama başlangıç hızlarını hesaplar ve bunlar, hız fonksiyonu için karşılık gelen ışın akımının yanında Tablo 1'de gösterilmektedir. Tablo 1'deki değerler, derleme sırasında otomatik olarak oluşturulan ve otomatik olarak hesaplanan sistem ışın parametrelerini kaydeden Arcam günlük dosyasından alınmıştır. Tablo 1'den, standart numune C0 ve numune C2 ve C3 üretimi arasında hem ışın akımında hem de hızda hafif bir artış ve azalma olduğu görülebilir. Bu, kontur geçişlerinin çıkarılması veya eklenmesi nedeniyle meydana gelen tarama uzunluğundaki değişiklikten kaynaklanır ve kontrol yazılımının daha uzun tarama geçişleri daha yüksek akımlar ataması nedeniyle meydana gelir; bu, hız fonksiyonu aracılığıyla, yaklaşık sabit bir oranı korumak için ışın hızını artırır. I/v 'nin S1-S3 örneklerinde hız fonksiyonu kasıtlı olarak azaltıldığında hız ve enerji yoğunluğunda daha önemli değişiklikler kaydedildi. Her eriyik koşulu için sonuçta uygulanan enerji yoğunluğu Tablo 1'de gösterilmektedir. Bu, başlangıçta standart numune (C0) için taramanın her iki kontura göre daha yüksek bir enerji yoğunluğuna sahip olduğunu öne süren 'başlangıç hızına' dayalı olarak hesaplanmıştır. Bununla birlikte, her numunenin ilk tarama geçişi bu hızda başlasa da, sonraki tarama çizgileri, ışın demeti gücünü artırmadan hızlarını artıran ve dolayısıyla enerji yoğunluğunu azaltan bir dönüş fonksiyonundan etkilenir (denklem (1)). Bu işlev, ileri geçişte yakın zamanda eriyen zaten sıcak olan alanın aşırı ısınmasını önlemek için her yeni geri kafes izinin başlangıcında hızı artırarak hızını artırmak için tasarlanmıştır.

Dönüşte hız artışı, ışın gücü sabit tutulurken, başlangıç hızının ve önceden erimiş alandan olan mesafenin üstel bir fonksiyonu tarafından kontrol edilir. Bir önceki tarama çizgisinin sonundan uzaklığa göre ışın hızı ve enerji yoğunluğundaki değişim Şekil 3'te gösterilmektedir.



Şekil 3: (a) ışın hızı ve (b) numuneler (C0–C7) için elde edilen enerji yoğunluğu üzerindeki 'dönme fonksiyonunun' etkisi. Not; C0 ve C6 çizgileri ayrıca Tablo 2'de belirtilen diğer örneklerin hızlarını temsil eder.

Şekil 3, tüm tarama çizgileri için değerleri göstermektedir. Standart ayarlarla, dönüş işlevi maksimum %75'lik bir hız artışı sağlayabilir, bu da kafes geçişinin başlangıcında enerji yoğunluğunda %43'lük bir azalmaya neden olur. Bu hız artışının etkisi, Şekil 3'te, döndürme fonksiyonunun etkinleştirildiği ve devre dışı bırakıldığı C0 ve C6 numuneleri, diğer tüm ayarlar sabit tutularak karşılaştırılarak gözlemlenebilir. Döndürme fonksiyonunun, taramalı alanın kenarından önemli bir mesafe boyunca hızı ayarladığı ve incelenen küçük örneklerde hızın tüm kesit genişliği boyunca daha yüksek olduğu ve hiçbir zaman ilk hızına veya enerji yoğunluğuna geri dönmediği görülebilir (eşittir). C6 hattı). Bu nedenle, taramalı alanın gerçek ortalama enerji yoğunluğu, başlangıç hızına dayalı olarak Tablo 2'de hesaplanan değerlerden çok daha düşüktür. Tahmini gerçek ortalama tarama enerjisi bu nedenle Tablo 2'ye dahil edilmiştir. Şekil 4'te, standart numunenin tüm hacmi boyunca gerçekleştirilen düşük çözünürlüklü XCT taramalarından elde edilen, segmentlere ayrılmış gözenek yüzeylerinin vurgulandığı örnek veri kümelerinin izometrik projeksiyonları gösterilmektedir, C0, (9,9 µm voksel boyutu ile) ve yüksek numune kenarından ve merkezinden 1,6 mm'lik işlenmiş kesitlerde (2,1 µm voksel boyutunda) gerçekleştirilen çözünürlük taramaları (Şekil 4b). Bu taramalardan elde edilen istatistiksel veriler de Tablo 4'te özetlenmiştir.



Şekil 4 : (a) voksel boyutu 9,9 μm olan standart küboidal numuneden (C0) ve (b) voksel boyutu 2,1 μm olan aynı numunenin kenar ve merkezinden elde edilen XCT veri kümelerinin örnekleri. İki yüksek çözünürlüklü taramanın yaklaşık konumu (a)'da mavi kutularla gösterilmiştir.

Tablo 3 : XCT verilerini almak için kullanılan cihaz ve ayarlar

Imaged sample size (mm)	Sample description	XCT system	Accelerating voltage (kV)	Power (W)	Exposure (ms)	Projections	Voxel size (μm)	Minimum detectable pore equiv. dia. (μm)
10 \times 10 \times 16	Whole samples	Custom Bay	160	17.6	1415	3143	9.9	24.6
1.75 \times 1.75 \times 1.75	Machined small regions	Versa 500	100	9.0	1000	1601	2.1	5.2
1.75 diameter	Powder	Versa 500	80	7.0	1000	1601	2.1	5.2

Tablo4: Tam numune düşük çözünürlüklü taramalardan ve standart küp numunesi C0 içindeki farklı bölgelerin yüksek çözünürlüklü taramalarından XCT ile elde edilen ortalama gözenek istatistiklerinin özeti. Ayrıca karşılaştırma amacıyla, C0 numunesinin standart metalografisi ve optik mikroskopi analizi ile elde edilen veriler de gösterilmiştir

Technique	Sample location	Voxel size (μm)	Volume/area analysed (mm^3/mm^2)	Volume fraction (%)	Number identified	Mean equiv. diam. (μm)	Max. equiv. diam. (μm)
XCT	Whole specimen	9.9	1599.3	0.072	2707	81.7	194.6
	Hatch centre	2.1	5.3	0.176	110	19.2	139.7
	Edge	2.1	5.0	0.083	285	13.8	153.0
	Powder	2.1	2.7	0.090	970	12.1	62.6
Optical microscopy	x-y plane	n/a	96.8	0.126	95	21.1	159.5
	x-z plane	n/a	97.5	0.138	106	18.1	129.3

İlk bakışta rastgele dağılmış görünen bir dizi gözenek boyutu görülebilir. Bununla birlikte, bu tür görüntülerin "göze" yansıtma olması nedeniyle gözeneklerin hacim fraksiyonunu aşırı vurgulama eğiliminde olduklarına dikkat edilmelidir. Daha dikkatli istatistiksel analiz olmadan, bu tür görüntüler gözeneklerin yoğunluğu ve uzamsal olarak kümelenme eğilimi hakkında yanlış bir izlenim verebilir. Yüksek çözünürlüklü sonuçlardan, Tablo 4'te SEBM işlemi için ölçülen gözeneklerin genel hacim oranının düşük olduğu ve %0.05-0.2 aralığında olduğu görülebilir. Bu rakamın bir alt sınır olduğu varsayılabilir, çünkü mikro-XCT sistemi çok küçük gözenekleri (çapı 5 μm 'den az) tespit edemediği için ve bu tür gözeneklerin genele çok az katkıda bulunduğundan, bunun yalnızca hafif bir eksik tahmin oluşturması beklenir. X-ışını tomografisinde çözünürlük sınırı, voksel boyutu ve özellikleri absorpsiyon farklılıklarından ayırt etme yeteneği ile ilgilidir. Voksel boyutu büyütme (geometrik ve optik) tarafından kontrol edilir ve ekipman tarafından belirlenen mutlak bir değerdir. Bu çalışmada kullanılan numune boyutları ve enstrümanlar için voksel boyutları Tablo 3'te verilmiştir. Çözünürlüğü tanımlamak daha zordur, ancak yeniden yapılandırılmış 3D voksel verilerinden algılanabilen en küçük özelliktir. Çözünürlük, aşağıdakiler de dahil olmak üzere bir dizi faktörden etkilenir: nokta X-ışını kaynağından ziyade sonlu bir X-ışını kaynağından kaynaklanan bulanıklık; numune içindeki X-ışını fotonlarının saçılması; ışın sertleştirme; sahne hareketinden kaynaklanan mekanik hatalar; ve yeniden yapılanma sırasında dönme merkezinin yanlış belirlenmesi. Bu etkilerin daha kapsamlı bir tartışması başka bir yerde mevcuttur. Burada yapılan ölçümlerde, bir gözenek içindeki boşluğun X-ışını zayıflaması, katı titanyum arka planından çok daha azdı. İyi bir kontrast sağlarken, daha kalın kesitlerde küçük gözenekleri tespit etmeye çalışırken bu hala önemli bir sorun olabilir. X-ışını kaynağı boyutu her zaman voksel boyutunun altında kaldı, dönme merkezi mümkün olan en iyi standartta belirlendi ve ışın sertleşmesi bir ön filtre ile düşürüldü. Ancak, sistem kurulumunun kalitesinden bağımsız olarak, tek bir voksel hala niceliklendirilemez, çünkü verideki sadece gürültü olma olasılığını göz ardı etmek imkansızdır. Ek olarak, gözenek AR gibi doğru morfolojik parametreleri belirlemek için kusur boyutuna göre daha büyük bir çözünürlük gereklidir. Bunun nedeni, bir kusur çok küçük olduğunda morfolojilerinin doğru bir şekilde temsil edilememesidir; yani nihayetinde bir voksel boyutunda bir gözenek bir küp olarak görünecektir. Bu nedenle gözenek boyutu dağılımlarını ve hacim fraksiyonlarını değerlendirmek için $2 \times 2 \times 2$ (8) vokselde oluşan daha düşük bir gözenek boyutu kesmesi kullanıldı ve morfolojik analiz için yalnızca minimum hacmi $5 \times 5 \times 5$ (125) olan nesneler analiz edildi; literatürde sunulan çözünürlük limitleri ile uyumludur.

4. Sonuçlar

SEBM-AM test numunelerinde bulunan gözeneklerin boyutu, hacim oranı ve uzaysal dağılımı, 3D XCT veri kümeleri kullanılarak daha önce bildirilenden daha ayrıntılı olarak karakterize edilmiştir. Rapor edilen sonuçlardaki güçlü eğilimler, burada sunulana benzer 3B verilerin, ekipman imalatçılarının kontrol algoritmalarını özellikle gözenekliliği azaltmak için optimize etmelerine yardımcı olmak için daha önce yaygın olarak mevcut olmaması gerçeğinin kısmen belirtisidir.

Bununla birlikte, AM'deki makine varsayılan işlem ayarlarının yalnızca gözenekliliği optimize etmek için değil, aynı zamanda parça oluşturma hızı ve mikro yapı gibi diğer rakip faktörleri göz önünde bulundurarak tasarlandığını da unutmamak gerekir. Ek olarak, standart ekipman ayarlarında nispeten basit ayarlamalarla önemli iyileştirmelerin yapılabilceği gösterilmiştir. Genel olarak, yüksek znrlkl XCT taramalarından elde edilen sonuçlar, optikmikroskopi ile daha geleneksel 2D ölçümlerle, çap olarak ~ 5 m'lik bir boyut sınırına kadar iyi bir uyum sağladı ve sonuçlara güven verdi. Bununla birlikte, ~25 m znrlk sınırına sahip daha kaba ölçekli taramaların, tüm yapı içindeki tüm büyük ölçekli kusurları bulmak için çok yararlı olduğu bulundu. Cesaret verici bir şekilde, XCT verilerinin analizi şunu göstermiştir: gözeneklerin ortalama hacim oranı çok düşüktü (b0.2%) ve genellikle SLM gibi diğer AM süreçlerinde bulunanın altındaydı. Gözeneklerin/kusurların rastgele dağılmadığı kesin olarak gösterildi ve bir parça bölümünün ana hatlarını çizmek (konturlama) ve doldurmak (tarama) için kullanılan süreç parametreleri ve stratejiler ile güçlü bir korelasyon bulundu, bu da yorulma ömrü üzerindeki etkilerini potansiyel olarak daha önemli hale getirdi. Standart yapı parametreleriyle, boşlukların büyük çoğunluğunun kk küresel gaz gözenekleri olduğu bulunmuştur. Bu gözeneklerin ağırlıklı olarak toz besleme stoğundaki argon kontaminasyonundan kaynaklandığı ve toz granüllerinde sıkışan daha kk gaz kabarcıklarının, yapım odasındaki azaltılmış basınç nedeniyle eriyik havuzunda genişleyip birleştiği düşünülmektedir. Daha nadir düzensiz şekilli gözeneklerin, katmanlar arasında füzyon eksikliği ile ilişkili olduğu bulundu. Bu kusurların bazıları oldukça büyüktü (190 m'ye kadar) ve ağırlıklı olarak kontur blėesinde yoğunlaşmışlardı. Kontur geçişleri tarafından eriyen yüzey tabakası içinde az sayıda gaz gözenekleri bulundu, çoğunluğu dolgu taramalı alanda yoğunlaştı. Bu davranış, kontur adımında kullanılan daha yüksek enerji yoğunluğuna bağlanmıştır. Bu, daha büyük ve daha da önemlisi daha derin bir eriyik havuzu oluşturur ve önceki katmanın daha yüksek düzeyde yeniden erimesini teşvik ederek gaz kabarcıklarının

kaçması için daha fazla fırsat verir. Kontur bölgesinde bulunan düzensiz şekilli gözeneklerin, Çoklu Işın Ayarının yeterli eriyik havuzu stabilitesi sağlamayan bir eseri olduğu varsayılır, ancak bu bağlantıyı kesin olarak kanıtlamak için daha fazla çalışmaya ihtiyaç vardır. Genel olarak, kuluçka bölgesindeki daha düşük ortalama enerji yoğunluğu, daha yüksek bir ortalama gaz gözenek yoğunluğu ile açıkça ilişkilidir. Bu bölgedeki enerji yoğunluğunu artırmak için işlem parametrelerinde yapılan basit değişiklikler, gözenek popülasyonlarında önemli azalmalar sağladı.

Ayrıca, daha odaklanmış bir ışının kullanılması, bunun oluşturduğu daha derin eriyik havuzu sayesinde, enerji girdisini artırmadan gaz gözenekliliğini azaltma fırsatı sundu. Standart yapı koşulları altında, bir kesit kenarından hareket edildiğinde, 0,9 mm ve 1,6–2 mm derinliklerde iki gözeneklilik tepe noktası görüldü. Her iki tepe noktası da kuluçka bölgesinin kenarı ile ilgiliydi. İlk tepe noktası, gaz kabarcıklarının her bir ambar geçişinin kenarına taşınması ve ardından eriyik havuzu yön değiştirdiğinde bir ambar hattının sonunda biriktirilmesiyle oluşturulmuştur. İkinci pikin, tarama bölgesindeki tornalama fonksiyonunun etkisinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Görünüşe göre bu fonksiyon, yörüngesini tersine çevirdiğinde ışın demetini aşırı hızlandırarak, ileri ışın demeti geçişinin bıraktığı artık ısıyı aşırı telafi ediyor. Bu, çok düşük enerji yoğunluğu ile sonuçlanır, bu da taramalı alanın kenarına yakın yerlerde daha fazla gaz gözeneklerinin görülmesine yol açar. [4]

Kaynakça

- [1] G.P. Dinda, L. Song, J. Mazumder, Fabrication of Ti–6Al–4V Scaffolds By Direct Metal Deposition, *Metall. Mater. Trans. A* 39A (2008) 2914–2922.
- [2] P. Heintz, L. Müller, C. Körner, R.F. Singer, F.A. Müller, Cellular Ti–6Al–4V structures with interconnected macro porosity for bone implants fabricated by selective electron beam melting, *Acta Biomater.* 4 (2008) 1536–1544.
- [3] P. Edwards, A. O'Conner, M. Ramulu, Electron beam additive manufacturing of titanium components: properties and performance, *J. Manuf. Sci. Eng.* 135 (2013) 061016.
- [4] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S104458031500039X>

1. SİNKROTRON IŞIK KAYNAĞI

Bir senkrotron ışık kaynağı, bilimsel ve teknik amaçlar için genellikle bir depolama halkası[1] tarafından üretilen bir elektromanyetik radyasyon (EM) kaynağıdır. İlk olarak senkrotronlarda gözlemlenen senkrotron ışığı, şimdi depolama halkaları ve tipik olarak elektronları hızlandıran diğer özel parçacık hızlandırıcıları tarafından üretiliyor. Yüksek enerjili elektron ışını üretildikten sonra, depolama halkalarındaki ve serbest elektron lazerlerindeki bükme mıknatısları ve yerleştirme cihazları (sallayıcılar veya kıpırdatıcılar) gibi yardımcı bileşenlere yönlendirilir. Bunlar, yüksek enerjili elektronları fotonlara dönüştürmek için gereken ışına dik olan güçlü manyetik alanları sağlar.



Şekil 1Elmas ışık kaynağı <https://www.diamond.ac.uk>

Senkrotron ışığının başlıca uygulamaları yoğun madde fiziği, malzeme bilimi, biyoloji ve tıptır. Senkrotron ışığı kullanan deneylerin büyük bir kısmı, maddenin yapısının nanometre altı elektronik yapı seviyesinden tıbbi görüntülemede önemli olan mikrometre ve milimetre seviyesine kadar araştırılmasını içerir. Pratik bir endüstriyel uygulamaya bir örnek, LIGA prosesi ile mikro yapıların üretilmesidir.

1.1 PARLAKLIK

X-ışını kaynaklarını karşılaştırırken, kaynağın kalitesinin önemli bir ölçüsüne parlaklık denir.[2] Parlaklık şunları dikkate alır:

a-Saniyede üretilen foton sayısı

b-Fotonların açısal sapması veya ışının ne kadar hızlı yayıldığı

c-Kirişin kesit alanı

d-Merkezi dalga boyunun veya frekansın %0,1'lik bir bant genişliğine (BW) düşen fotonlar

Sonuçta ulaşılan formül:

$$parlaklık = \frac{foton}{saniye.mrad^2.mm^2.0.1\%BW}$$

1.2 SİNKROTRON RADYASYONU

Synchrotron radyasyonu, hızlandırıcılarda ya bir sıkıntı olarak, parçacık fiziği bağlamlarında istenmeyen enerji kaybına neden olarak veya çok sayıda laboratuvar uygulaması için kasıtlı olarak üretilen bir radyasyon kaynağı olarak ortaya çıkabilir. Elektronlar, tipik olarak gigaelektronvolt aralığında olan bir nihai enerji elde etmek için birkaç aşamada yüksek hızlara hızlandırılır. Elektronlar, güçlü manyetik alanlar tarafından kapalı bir yolda hareket etmeye zorlanır. Bu bir radyo antenine benzer, ancak görelî hızın Doppler etkisinden dolayı gözlemlenen frekansı bir faktörü ile değiştirmesi farkıyla. Göreceli Lorentz büzülmesi, frekansı bir başka gamma faktörüyle çarpar, böylece elektronları X-ışını aralığına hızlandıran rezonans boşluğunun gigahertz frekansını çarpar. Göreliliğin bir başka dramatik etkisi, radyasyon modelinin, görelî olmayan teoriden beklenen izotropik dipol modelinden aşırı derecede ileriye dönük bir radyasyon konisine çarpıtılmasıdır. Bu, senkrotron radyasyon kaynaklarını bilinen en parlak X-ışınları kaynakları yapar. Düzlemsel ivme geometrisi, yörünge düzleminde gözlemlendiğinde radyasyonu lineer olarak polarize eder ve bu düzleme küçük bir açıyla gözlemlendiğinde dairesel olarak polarize olur. Spektroskopi ve kırınım için senkrotron radyasyonu kullanmanın avantajları, 1960'lar ve 1970'lerden başlayarak sürekli büyüyen bir bilim topluluğu tarafından gerçekleştirilmiştir. Başlangıçta, hızlandırıcılar parçacık fiziği için inşa edildi ve giriş borularında fazladan delikler açarak bükülen mıknatıs radyasyonunun çıkarılması gerektiğinde senkrotron radyasyonu "parazitik modda" kullanıldı. Senkrotron ışık kaynağı olarak görevlendirilen ilk depolama halkası, 1968'de ilk kez faaliyete geçen Synchrotron Radyasyon Merkezi'nde Tantalus'tur.[3] Hızlandırıcı senkrotron radyasyonu daha yoğun hale geldikçe ve uygulamaları daha umut verici hale geldikçe,

senkrotron radyasyonunun yoğunluğunu artıran cihazlar mevcut halkalara yerleştirildi. Üçüncü nesil senkrotron radyasyon kaynakları, başlangıçtan itibaren parlak X-ışınları üretmek için tasarlandı ve optimize edildi. Son derece zorlu ve muhtemelen henüz tasarlanmamış deneyler için ultra parlak, darbeli zaman yapılandırılmış X-ışınları üretmek için farklı konseptler içerecek olan dördüncü nesil kaynaklar değerlendiriliyor.

Hızlandırıcılardaki bükme elektromıknatısları ilk önce bu radyasyonu oluşturmak için kullanıldı, ancak daha güçlü radyasyon üretmek için bazen diğer özel cihazlar - yerleştirme cihazları - kullanılmaktadır. Akım (üçüncü nesil) senkrotron radyasyon kaynakları, tipik olarak, depolama halkasının düz bölümlerinin, elektronları zorlayan periyodik manyetik yapılar (değişken N ve S kutupları modelinde birçok mıknatıstan oluşan - yukarıdaki şemaya bakın) içerdiği bu yerleştirme cihazlarına bağlıdır. sinüzoidal veya sarmal bir yola. Böylece, tek bir bükülme yerine, kesin olarak hesaplanmış konumlardaki onlarca veya yüzlerce "kıpırdama" ışının toplam yoğunluğunu toplar veya çoğaltır.

Bu cihazlara kıpırdatıcı veya dalgalayıcı denir. Bir dalgakıran ile bir kıpırdatıcı arasındaki temel fark, manyetik alanlarının yoğunluğu ve elektronların düz çizgi yolundan sapmanın genliğidir.

Depolama halkasında radyasyonun çıkmasına ve deneycilerin vakum odasına bir ışın çizgisini takip etmesine izin vermek için açıklıklar vardır. Modern üçüncü nesil senkrotron radyasyon kaynaklarından çok sayıda bu tür ışın çizgileri ortaya çıkabilir.

2. KATMANLI İMALAT

"Katmanlı imalat" terimi, üç boyutlu nesneleri bir seferde çok ince bir katman olarak büyüten teknolojilere atıfta bulunur. Birbirini izleyen her katman, önceki erimiş veya kısmen erimiş malzeme katmanına bağlanır. Nesneler, esasen nesneyi ultra ince katmanlara "dilimleyen" .stl dosyaları oluşturmak için kullanılan bilgisayar destekli tasarım (CAD) yazılımı tarafından dijital olarak tanımlanır. Bu bilgi, malzemeyi bir önceki katmana tam olarak yerleştirdiği için bir püskürtme başlığının veya yazıcı kafasının yolunu yönlendirir. Veya bir lazer veya elektron ışını, toz halindeki bir malzeme yatağında seçici olarak erir veya kısmen erir. Malzemeler soğudukça veya sertleştikçe üç boyutlu bir nesne oluşturmak üzere birleşirler[9].

GE Additive, metal parçaların eklemeli üretimi için Toz Yatak Füzyon (PBF) makineleri geliştirme konusunda uzmanlaşmıştır. GE'nin PBF kategorisinde sunduğu ve Amerikan Test ve Malzemeler Derneği (ASTM) tarafından tanınan üç süreç şunları içerir: Doğrudan Metal Lazer Eritme (DMLM), Elektron Işını Eritme (EBM), Bağlayıcı Püskürtme.

GE Additive'in tüm makinelerinde süreç, metal tozu katmanının katman katman yayılmasını içerir ve bir parça oluşturmak için tozu eritmek ve birleştirmek için bir lazer veya elektron ışını kullanır. İşlem, tüm parça oluşturulana kadar tekrarlanır. Gevşek veya kaynaşmamış toz, işlem sonrası sırasında çıkarılır ve bir sonraki yapı için geri dönüştürülür.

2.1 SLA

Fotopolimer reçineyi (ışığa maruz kaldığında özelliklerini değiştiren polimer) katman katman kürlemek için lazer teknolojisi kullanan çok yüksek son teknoloji.

Yapı bir reçine havuzunda gerçekleşir. Reçine havuzuna yönlendirilen bir lazer ışını, söz konusu katman için modelin enine kesit modelini izler ve onu iyileştirir. İnşa döngüsü sırasında, yapının yeniden konumlandırıldığı platform, tek bir katman kalınlığı kadar düşürülür. İşlem, yapı veya model tamamlanana ve izlemesi büyüleyici olana kadar tekrarlanır. Bazı model özelliklerine destek eklemek için özel malzeme gerekebilir. Modeller işlenebilir ve enjeksiyon kalıplama, ısıyla şekillendirme veya diğer döküm işlemleri için kalıp olarak kullanılabilir.

2.2 FDM

Termoplastik (ısı uygulandığında sıvıya dönüşen ve soğutulduğunda katılaşan polimer) malzemelerin indeksleme memeleri aracılığıyla bir platform üzerine enjekte edilmesini içeren proses odaklı. Nozullar, bir sonraki katmanın uygulanmasından önce termoplastik malzeme sertleşmesi ile her belirli katman için enine kesit modelini izler. İşlem, yapı veya model tamamlanana ve izlemesi büyüleyici olana kadar tekrarlanır. Bazı model özelliklerine destek eklemek için özel malzeme gerekebilir. SLA'ya benzer şekilde, modeller işlenebilir veya kalıp olarak kullanılabilir. Kullanımı çok kolay ve serin.

2.3 MJM

Multi-Jet Modeling, ileri geri hareket edebilen (3 boyut-x, y, z) bir kafanın, bir termopolimer malzeme katmanını, katman katman uygulamak için yüzlerce küçük jet içerdiği bir mürekkep püskürtmeli yazıcıya benzer.

2.4 3DP

Bu, nişasta ya da alçı bazlı malzeme tozuyla doldurulmuş bir kapta bir model oluşturmayı içerir. Bir mürekkep püskürtmeli yazıcı kafası mekikleri, bir katman oluşturmak için az miktarda bağlayıcı uygular. Bağlayıcı uygulandıktan sonra, daha fazla bağlayıcı uygulanarak önceki katmanın üzerine yeni bir toz katmanı süpürülür. Model tamamlanana kadar süreç tekrarlanır. Model gevşek pudra ile desteklendiğinden desteğe gerek yoktur. Ayrıca, renkleri oluşturan tek işlem budur.

2.5 SLS

SLA teknolojisine benzer bir şekilde Seçici Lazer Sinterleme (SLS), küçük plastik, metal, seramik veya cam parçacıklarını kaynaştırmak için yüksek güçlü bir lazer kullanır. İnşa döngüsü sırasında, yapının yeniden konumlandırıldığı platform, tek bir katman kalınlığı kadar düşürülür. İşlem, yapı veya model tamamlanana kadar tekrarlanır. SLA teknolojisinin aksine, yapı sinterlenmemiş malzeme ile desteklendiğinden destek malzemesine gerek yoktur[10].

3. SİNKROTRON KARAKTERİZASYON

3.1 SPEKTROSKOPİ

X-ışını absorpsiyon spektroskopisi (XAS), malzeme ve moleküllerdeki atomların koordinasyon yapısını incelemek için kullanılır. Senkrotron ışın enerjisi, ilgili bir elemanın absorpsiyon kenarı boyunca ayarlanır ve absorpsiyondaki modülasyonlar ölçülür. Fotoelektron geçişleri, absorpsiyon kenarına yakın modülasyonlara neden olur ve bu modülasyonların analizi (X-ışını absorpsiyona yakın kenar yapısı (XANES) veya yakın kenar X-ışını absorpsiyonu ince yapısı (NEXAFS) olarak adlandırılır) kimyasal durum ve yerel hakkında bilgi verir. bu elemanın simetrisi. Absorpsiyon

kenarından çok daha yüksek gelen ışın enerjilerinde, fotoelektron saçılması, genişletilmiş X-ışını absorpsiyon ince yapısı (EXAFS) olarak adlandırılan "zil sesi" modülasyonlarına neden olur. EXAFS rejiminin Fourier dönüşümü, emici atomu çevreleyen bağ uzunluklarını ve sayısını verir; bu nedenle sıvıların ve amorf malzemelerin[4] yanı sıra safsızlıklar gibi seyrek türlerin incelenmesi için yararlıdır. İlgili bir teknik olan X-ışını manyetik dairesel dikroizm (XMCD), bir elementin manyetik özelliklerini ölçmek için dairesel polarize X-ışınları kullanır.

X-ışını fotoelektron spektroskopisi (XPS), bir fotoelektron analizörü ile donatılmış hüzme hatlarında gerçekleştirilebilir. Geleneksel XPS, tipik olarak, bir malzemenin vakum altında en üstteki birkaç nanometresini araştırmakla sınırlıdır. Bununla birlikte, senkrotron ışığının yüksek yoğunluğu, gazın ortama yakın basınçlarında yüzeylerin XPS ölçümlerini mümkün kılar. Ortam basıncı XPS (AP-XPS), simüle edilmiş katalitik veya sıvı koşullar altında kimyasal olayları ölçmek için kullanılabilir.[5] Yüksek enerjili fotonların kullanılması, bir laboratuvar XPS cihazında üretilenlerden çok daha uzun esnek olmayan ortalama serbest yola sahip olan yüksek kinetik enerjili fotoelektronlar verir. Sinkrotron XPS'nin araştırma derinliği bu nedenle birkaç nanometreye kadar uzatılabilir, bu da gömülü arayüzlerin çalışmasına izin verir. Bu yöntem, yüksek enerjili X-ışını fotoemisyon spektroskopisi (HAXPES) olarak adlandırılır[6].

Malzeme bileşimi, X-ışını floresansı (XRF) kullanılarak nicel olarak analiz edilebilir. XRF algılaması, belirli bir elementin absorpsiyonundaki değişikliği ölçmenin gerekli olduğu XAS ve XSW gibi diğer birkaç teknikte de kullanılır.

Diğer spektroskopi teknikleri arasında açılı çözünümlü fotoemisyon spektroskopisi (ARPES), yumuşak X-ışını emisyon spektroskopisi ve Mössbauer spektroskopisi ile ilgili nükleer rezonans titreşim spektroskopisi yer alır.

3.2 GÖRÜNTÜLEME

Synchrotron X-ışınları, geleneksel X-ray görüntüleme, faz kontrastlı X-ray görüntüleme ve tomografi için kullanılabilir. X-ışınlarının Ångström ölçekli dalga boyu, görünür ışığın kırınım sınırının çok altında görüntülemeye olanak tanır, ancak pratikte şimdiye kadar elde edilen en küçük çözünürlük yaklaşık 30 nm'dir[7]. Bu tür nanoprob kaynakları, taramalı X-ışını mikroskobu (STXM) için kullanılır. Görüntüleme, bir numunenin kimyasal bileşimini veya oksidasyon durumunu mikron altı çözünürlükle

haritalamak için X-ışını floresan veya X-ışını absorpsiyon spektroskopisi gibi spektroskopi ile birleştirilebilir.[8]

Diğer görüntüleme teknikleri, tutarlı kırınım görüntülemeyi içerir.

MEMS yapıları için fotolitografi için benzer optikler kullanılabilir, LIGA işleminin bir parçası olarak bir senkrotron ışını kullanabilir.

3.3 LİTERATÜRDE KARAKTERİZASYON

Additive Manufacturing 41 (2021) 101969

Contents lists available at ScienceDirect

Additive Manufacturing

journal homepage: www.elsevier.com/locate/addma

ELSEVIER

Research Paper

Synchrotron X-ray imaging of directed energy deposition additive manufacturing of titanium alloy Ti-6242

Yunhui Chen^{a,b,*}, Samuel J. Clark^{a,b,1}, Lorna Sinclair^{a,b}, Chu Lun Alex Leung^{a,b}, Sebastian Marussi^{a,b}, Thomas Connolly^c, Robert C. Atwood^c, Gavin J. Baxter^d, Martyn A. Jones^d, Iain Todd^e, Peter D. Lee^{a,b,*}

^a Mechanical Engineering, University College London, Torrington Place, London WC1E 7JE, UK
^b Research Complex at Harwell, Rutherford Appleton Laboratory, Oxfordshire OX11 0FA, UK
^c Diamond Light Source, Harwell Campus, Oxfordshire OX11 0DE, UK
^d Rolls-Royce plc, PO Box 31, Derby DE24 8BJ, UK
^e Department of Materials Science and Engineering, Sir Robert Hadfield Building, Mappin Street, Sheffield S1 3JD, UK

ARTICLE INFO

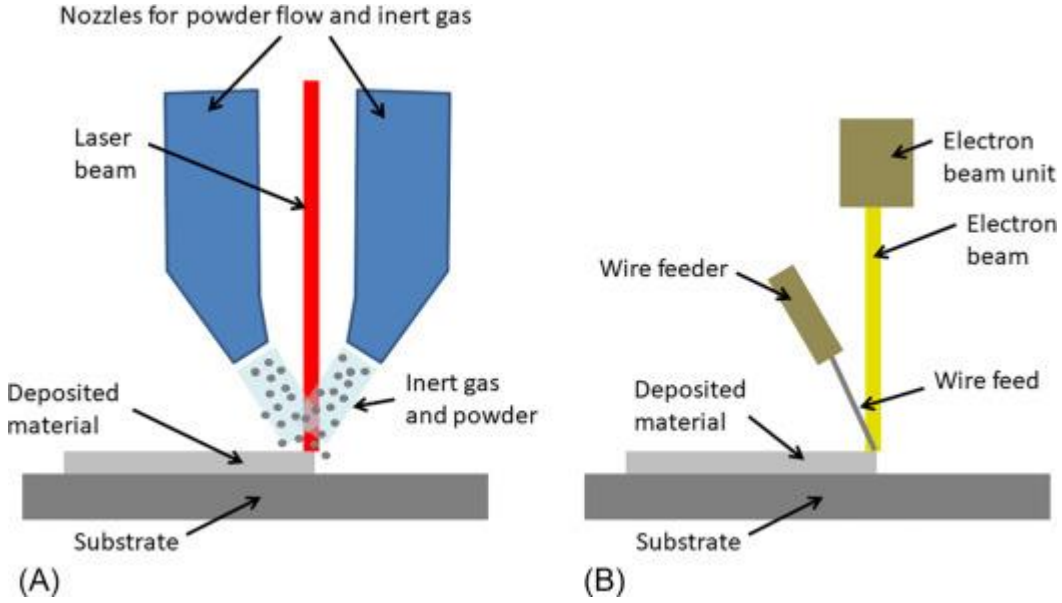
Keywords:
Directed Energy Deposition
Synchrotron X-ray imaging
Laser Additive Manufacturing
Pore formation

ABSTRACT

Directed Energy Deposition Additive Manufacturing (DED-AM) is transformative for the production of larger, geometrically complex metallic components. However, the mechanical properties of titanium alloy DED-AM components do not always reach their full potential due to microstructural features including porosity and regions of lack of fusion. Using in situ and *operando* synchrotron X-ray imaging we gain insights into key laser-matter interaction and microstructural feature formation mechanisms during DED-AM of Ti-6242. Analysis of the process conditions reveals that laser power is dominant for build efficiency while higher traverse speed can effectively reduce lack of fusion regions. We also elucidate the mechanisms underlying several physical phenomena occurring during the deposition of titanium alloys, including the formation of a saddle-shaped melt pool and pore pushing. The findings of this work clarify the transient kinetics behind the DED-AM of titanium alloys and can be used as a guide for optimising industrial additive manufacturing processes.

Yönlendirilmiş enerji depozisyonu katmanlı imalatı (DED-AM) daha büyük , karmaşık geometrik metal parçalar için dönüşüm niteliğindedir. Ancak Titanyum alaşımlarının DED-AM ile üretilen parçaları her zaman mekanik özelliklerine ulaşamamaktadır. Bunun sebebi mikroyapıdaki gözenek ve partiküllerin eksik füzyonudur. In situ ve operando sinkrotron X-ışını görüntülemeleri kullanılarak Titanyum 6242 alaşımının DED-AM lazer-madde etkileşiminin anahtar oluşum mekanizmalarına dair bilgiler elde edilmiştir. Prosesin koşullarının analizi lazer gücünün inşaa verimliliğinde ve hareket hızının eksik füzyonun engellenmesinde etkilerini ortaya çıkarmıştır. Ayrıca titanyum alaşımlarının biriktirilmesi sırasında meydana gelen çeşitli fiziksel olayların altında yatan mekanizmaların ki bunların içinde eyer şeklindeki eriyik havuzun oluşumu ve

gözeneklerin itici etkisi dahil incelenmiştir. Bu çalışmanın bulguları, titanyum alaşımlarının DED-AM'sinin arkasındaki geçici kinetiği netleştiriyor. ve endüstriyel eklemeli üretim süreçlerini optimize etmek için bir kılavuz olarak kullanılabilir.



Şekil 2 DED-AM toz ve kablo yöntemleri A ve B[11]

3.4 MASAÜSTÜ SİNKROTRON TEKNOLOJİSİ

Sinkrotron X-ışını bilgisayarlı tomografisi (SXCT), mikro bilgisayarlı tomografi ve nano bilgisayarlı tomografi için ışık kaynağı olarak yüksek kolimasyon ve düşük kırınımlı X-ışını ışınları içeren senkrotron radyasyonu kullanır. SXCT'nin ana avantajı, nesnelerin iç kısmının yüksek çözünürlüklü ve tahribatsız görselleştirilmesidir. SXCT, biyoloji çalışmalarında ve tümör büyümesinin görselleştirilmesi ve nanofabrikasyon gibi endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak uygulanmaktadır.

Bir hastanede iyi kalibre edilmiş bir CT tarayıcı kullanılarak elde edilen görüntülerle karşılaştırıldığında, SXCT ile elde edilenler, dedektördeki kusurların neden olduğu halka artefaktları gibi artefaktları daha fazla içerir. SXCT'de nesne, farklı açılardan projeksiyonlar elde etmek için dikey bir eksen etrafında döner. Bu görüntü elde etme işlemi, yeniden yapılandırma adımlarına hataların girişini önemli ölçüde artırır ve yeniden yapılandırma parametreleri doğru değilse ciddi artefaktlar üretir. Örneğin, diyapazon yapaylıkları bir yeniden yapılandırma parametresindeki hatalardan kaynaklanır. Dönen bir nesne gerektiğinden, tutucunun mekanik kararsızlığı da

görüntüler nano ölçekte olduğunda önemli bir sorundur. En kötü durumda, yeniden yapılandırma mümkün değildir[12].

4. KAYNAKÇA

- [1] Handbook on Synchrotron Radiation, Volume 1a, Ernst-Eckhard Koch, Ed., North Holland, 1983,
- [2] Nielsen, Jens (2011). Elements of modern X-ray physics. Chichester, West Sussex: John Wiley. ISBN 9781119970156.
- [3] E. M. Rowe and F. E. Mills, Tantalus I: A Dedicated Storage Ring Synchrotron Radiation
- [4] Sayers, Dale E.; Stern, Edward A.; Lytle, Farrel W. (1971-11-01). "New Technique for Investigating Noncrystalline Structures: Fourier Analysis of the Extended X-Ray—Absorption Fine Structure". Physical Review Letters. 27 (18): 1204–1207. Bibcode:1971PhRvL..27.1204S
- [5] Bluhm, Hendrik; Hävecker, Michael; Knop-Gericke, Axel; Kiskinova, Maya; Schlögl, Robert; Salmeron, Miquel (2007). "In Situ X-Ray Photoelectron Spectroscopy Studies of Gas-Solid Interfaces at Near-Ambient Conditions" MRS Bulletin. 32 (12): 1022–1030. doi:10.1557/mrs2007.211
- [6] Sing, M.; Berner, G.; Goß, K.; Müller, A.; Ruff, A.; Wetscherek, A.; Thiel, S.; Mannhart, J.; Pauli, S. A.; Schneider, C. W.; Willmott, P. R.; Gorgoi, M.; Schäfers, F.; Claessen, R. (2009-04-30). "Profiling the Interface Electron Gas of LaAlO₃/SrTiO₃ Heterostructures with Hard X-Ray Photoelectron Spectroscopy". Physical Review Letters. 102 (17): 176805. arXiv:0809.1917
- [7] Argonne National Laboratory Center for Nanoscale Materials, "X-Ray Microscopy Capabilities"
- [8] Beale, Andrew M.; Jacques, Simon D. M.; Weckhuysen, Bert M. (2010). "Chemical imaging of catalytic solids with synchrotron radiation". Chemical Society Reviews. 39 (12): 4656–4672. doi:10.1039/c0cs00089b
- [9]"katmanlı imalat" erişim tarihi 14/12/2021 adres" <https://www.ge.com/additive/additive-manufacturing>

[10]"katmanlı imalat temel" erişim tarihi 14/12/2021 adres"

<https://additivemanufacturing.com/basics/>"

[11] S.L. Sing, C.F. Tey, J.H.K. Tan, S. Huang, Wai Yee Yeong, 2 - 3D printing of metals in rapid prototyping of biomaterials: Techniques in additive manufacturing, Editor(s): Roger Narayan, In Woodhead Publishing Series in Biomaterials, Rapid Prototyping of Biomaterials (Second edition), Woodhead Publishing, 2020, Pages 17-40, ISBN 9780081026632,

<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102663-2.00002-2>.

[12] Cheng, CC., Ching, YT., Ko, PH. et al. Correction of center of rotation and projection angle in synchrotron X-ray computed tomography. Sci Rep 8, 9884 (2018).

<https://doi.org/10.1038/s41598-018-28149-8>