

FONKSİYONEL DERECELENDİRİLMİŞ MALZEMELERİN ÜRETİM TEKNİKLERİ VE KULLANIM ALANLARI

Aylin KONEZ Atılım Üniversitesi	Hikmet ALAGÖZ Cemre Isıtma Soğutma Ltd. Şti.	Serra TOPAL Makina Mühendisi	Prof. Dr. Müfit GÜLGEÇ Prof. Dr. Gazi Üniversitesi
------------------------------------	--	---------------------------------	--

ÖZET

Uzay araçları ve gelecek nesil fizyon reaktörleri uygulamalarında ısıl gerilmeleri azaltmada kullanılmak üzere geliştirilmiş ve bu uygulamalarda anahtar teknoloji görevinde olan Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzeme (FDM) kavramını, dereceli yapısal fonksiyonlara sahip metal/seramik kompozisyonlu yeni bir malzeme olarak tanımlayabiliriz. FDM'in en büyük avantajı, yapı boyunca tokluk ve diğer malzeme özelliklerine ait dereceli fonksiyonlar içermesidir.

Derecelendirilmiş kompozisyona sahip bu malzemede üretim teknikleri arasındaki farklılardan ortaya çıkabilecek malzeme iç yapısındaki değişiklikleri ve bunların sonuçlarını anlayabilmek için üretim tekniklerini, birbirleri arasındaki farklılıkları iyi bilmek gerekir. Bu çalışmada FDM üretim teknikleri ve aralarındaki farklılıklar kısaca incelenecektir. Daha sonra yeni teorik çalışma olan Milimetrik Dalga Huzmesi ile Üretim Tekniği anlatılacaktır. Ayrıca FDM'in kullanım alanlarına değinilecektir.

Anahtar sözcükler: Fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme, üretim teknikleri, kullanım alanları.

ABSTRACT

Functionally Gradient Materials (FGM) is a new material concept, which is developed and widely used to reduce the thermal stresses in space craft and next generation fission reactors applications. Thus, it can be called a key technology in these fields. FGM has its greatest advantage by having graded functions of toughness and other material properties through metal/ceramic composition of the body.

Manufacturing techniques and differences of these processes should be understood well to realize the conclusions of the variations in materials' compositions which arise because of the different ways of production techniques. In this study, FGMs' manufacturing techniques and the differences between these techniques will be basically mentioned. In addition, production with "Milimetric Wave Beam", which is a new theoretical proposal and usage fields of FGMs will be discussed.

Keywords: Functionally Gradient Materials, manufacturing techniques, usage fields.

GİRİŞ

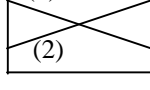
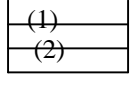
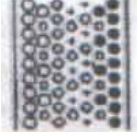

Ortaçağda silahlar ve aletler ya çok yumuşak dövme demirden ya da çok sert olan ve kolay kırılabilen dökme demirden yapılmaktaydı. Zamanla dökme ve dövme demirden daha kullanışlı ve değerli olan eritme çelik kullanılmaya başlandı. O günlerde çelik, demire göre büyük bir ilerlemeydi. Günümüzde ise metal alaşımları daha iyi bir performansa sahip olmalarının yanında başta uzay ve uçak jet motorları olmak üzere geniş bir kullanım alanına sahiptirler.

Ancak gelişen teknoloji ile özel karakterlere sahip malzeme gereksinimi çok büyük bir hızla artmaktadır ve bu hızla orantılı olarak metal alaşımları gereksinimi karşılayamaz hale gelmiştir. Özellikle uzay taşıtlarındaki gereksinim olan, yüksek mukavemet ve ısı direnç özelliğini sağlayan homojen bir malzemenin bulunmayışı araştırmacıları yeni arayışlara yönlendirmiştir [1]. Bu arayışlar sonucunda birçok özelliği bir arada bulunduran ideal malzeme kombinasyonları, metal ve seramikler önem kazanmıştır. Bu malzeme çiftinden metal; tokluğa, elektrik geçirgenliğine, işlenebilirliğe, seramik ise; düşük yoğunluğa, yüksek mukavemete, katılığa ve ısı dirence sahiptir. Bu özellikleri bünyesinde taşıyan malzeme ise Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzeme (FDM)'dir [2].

Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemeler (FDM)'de (Functionally Graded Materials (FGM)), malzeme yapı ve kompozisyonu cismin içerisinde kademeli/dereceli olarak değişir, ve bunun sonucunda malzeme özellikleri değişir. Amaca uygun olarak FDM kavramı uygulanarak, malzemelerin gelişmesi ve yeni fonksiyonlarının oluşturulması amaçlanmaktadır [3].

En çok kullanılan FDM, bir metalden bir seramiğe doğru geçişin olduğu yapıdır. Özellikleri itibariyle birbirinden farklı fonksiyonlar bu şekilde birleştirilebilir, örneğin metallerin yüksek toklukları, işlenebilirlikleri ve bağ kurma yetenekleri ile; seramiklerin ısı, aşınma ve oksitlenme dirençleri gibi [4].

Şekil 1’de FDM ile sıradan kompozit malzemelerin mikro yapısı ve özellikleri karşılaştırılmıştır [5].

Malzemeler	Örnekler	FDM	FDM olmayan
Fonksiyonları/ Özellikleri	(1)Mekanik mukavemeti (2)Isıl Geçirgenliği	(1)  (2)	(1)  (2)
Yapısı	Seramik (○) Metal(●) Elyaf (◇+) Boşluk (○)		

Şekil 1. FDM İle Sıradan Kompozit Malzemelerin Mikro Yapısı ve Özellikleri

FDM konsepti, 1984’te Japonya’da bir uzay mekiği projesi sırasında, 10 mm’den ince bir kesit için, 2000 K seviyesinde bir yüzey sıcaklığına ve 1000 K’lik bir sıcaklık aralığına dayanabilecek bir ısı bariyer malzemesi önerisi ile ortaya çıkmıştır. 1984’ten bu yana, FDM ince filmleri çok geniş çapta araştırılmaktadır [6].

FDM’in üretim metotlarını kuru ve yaş metot olmak üzere iki ana grupta toplamak mümkündür. Bu iki ana gruba giren metotlar aşağıdaki gibi sıralanabilir:

1. Kuru Metot

- a. Toz Metalürjisi
- b. Plazma Spreyiyle Kaplama
- c. SHS (Self-Propagating High-Temperature Synthesis)
- d. CVD Fırını ile Kaplama
- e. Pervane Kuru Karıştırma (IDB)

2. Yaş Metot

- a. Endüksiyonla Yığıma
- b. Slip Döküm
- c. Santrifüj Döküm

Makalenin bundan sonraki bölümlerinde yukarıda sıralanan üretim metotları sırasıyla anlatılacaktır.

1. KURU METOD

1.1. TOZ METALURJİSİ

Toz metalurjisiyle FDM üretimi,

- düşük maliyetler,
- daha fazla ham madde bulunabilirliği,
- daha basit işlem teçhizatları,
- daha az enerji tüketimi,
- daha kısa işlem süreleri gibi avantajlar sunmaktadır.

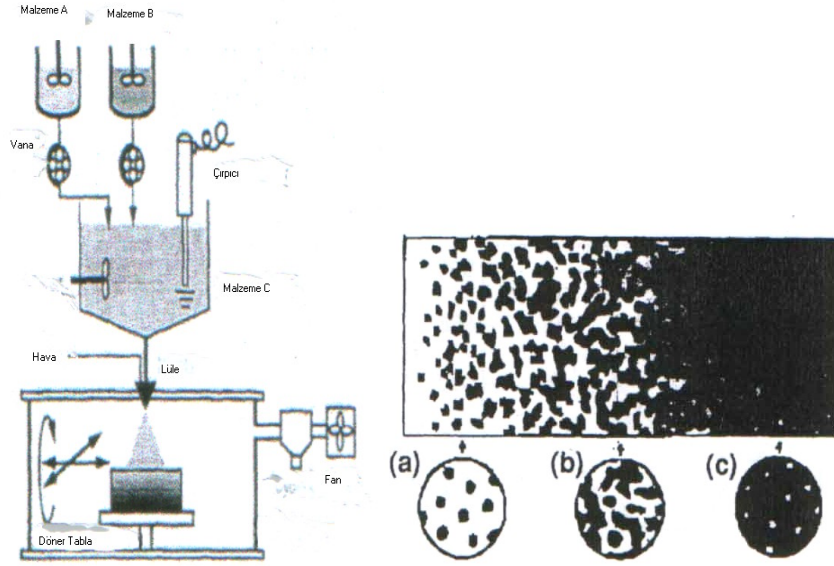
Küresel anlayışa göre T/M malzemelerindeki daha yüksek avantajlar şöyle sıralanabilir:

- daha yüksek bir düzenli özellikteki bileşim,
- çökelti ve karbürler gibi ikincil fazlarda daha iyi ve daha düzenli bir dağılım [7].

Toz Metalurjisi metodunda istenilen mikro yapıda, fiziksel ve mekanik özelliklerde malzeme üretimine imkan veren bu yöntemle eşsiz özelliklerde ve neredeyse sınırsız sayıda geleneksel malzemelerden daha farklı alaşım ve kompozit malzeme üretmek mümkündür.

T/M yöntemiyle bazı işlem basamakları uygulanmaksızın istenen ölçülerde ve doğrudan yerine takılarak kullanılmaya uygun parçaların üretimi mümkün olduğundan diğer üretim tekniklerinden daha kısa bir imalat çevrim süresine sahiptir [8].

Şekil 2 toz spreyi ile istif sistemini şematik olarak ve bu metotla üretilmiş Metal/Seramik FDM malzemeyi göstermektedir [9].



Şekil 2. Toz Spreyi İle İstif Sistemi ve T/M Prosesiyle Üretilmiş Metal/Seramik Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzeme Mikro Yapısı.

(a) Dağıtılmış yapı, (b) Ağ yapısı, (c) Dağıtılmış alternatif yapı.

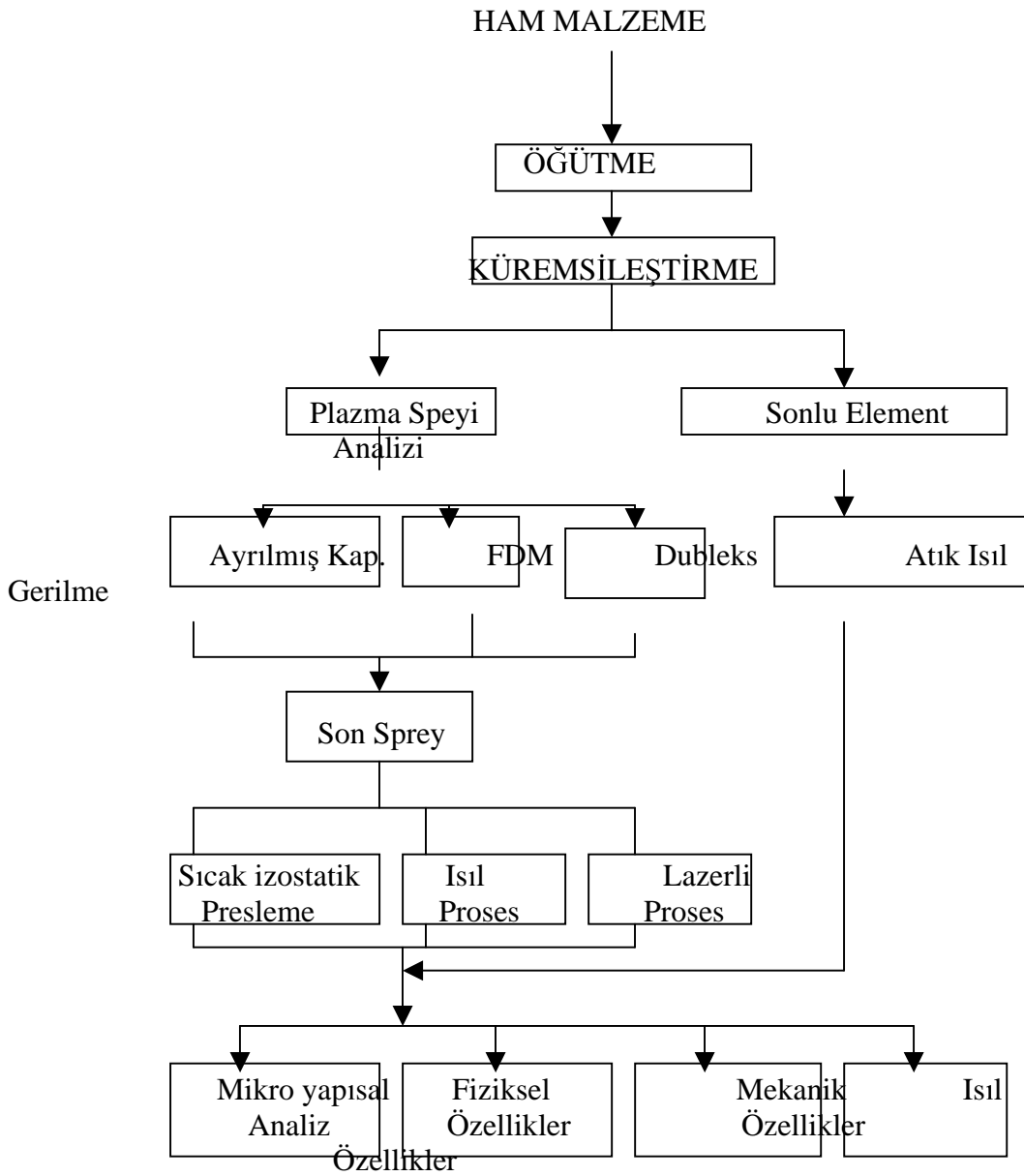
Ruiz-Navas'a göre, T/M ile bir X-Y FDM'inin üretiminde şu adımlar izlenmiştir:

- 1- Matrix malzemesi olarak, X tozu, ve donatı malzemesi olarak Y tozu sağlanmıştır.
- 2- Paslanmaz çelikten bir kaptaki yükün 1/3'ü yüksek enerjili bilyeler, 1/3'ü malzeme ve 1/3'ü hava olmak üzere, 40 saat boyunca 180 rpm hızla öğütme işlemine tabi tutulmuştur.
- 3- Farklı yüzdelere (örn. hacmin % 2,5, 5, 8) elde edilmesi için pek çok öğütme yapılmıştır. Tozların morfoloji, donatı dağılımı ve mikro-sertlik özelliklerinde karma yapılar elde edilmiştir.
- 4- Örnekler daha sonra klasik T/M tekniklerinden geçirilmiştir: tek eksenli presleme ve sinterleme. Pres ve sinter öncesi, öğütmenin yüksek enerji içermesi sebebiyle, ve pres sırasında tozu deforme edebilmek için öncelikle bir tavlama uygulanmıştır. Tavlama 1 saat süreyle, 450 °C'de 5 K/dk ısıtma ile Argon atmosferi altında uygulanmıştır.
- 5- Pres sırasında çinko stearat, yağlayıcı olarak kullanılmıştır.
- 6- Tekil tabakaların önceden ayrı ayrı preslenmesi yerine, farklı yüzdelere Y içeren tozlar tek bir seferde 600 MPa basınçla basılmıştır.
- 7- Preslemeden sonra, örnekler 30 dakika boyunca 1250 °C'de Argon altında sinterlenmiştir.

1.2. PLAZMA SPREYLEME

Isıl bariyer kaplamalar genellikle sistemin ısı verimliliğini arttırarak çalışma sıcaklığını yükseltmek amacıyla ve korozyon, oksidasyon veya aşınmayı önlemek amacıyla kullanılırlar. Malzemeler arasındaki ısı genleşme katsayısındaki uyumsuzluktan dolayı oluşan ısıl gerilmeleri önleyebilmek için dereceli değişen FDM'den yapılmış kaplamalar tercih edilmektedir [10].

Isıl bariyer kaplamadaki işlem basamakları ise Şekil 3'te verilmiştir.

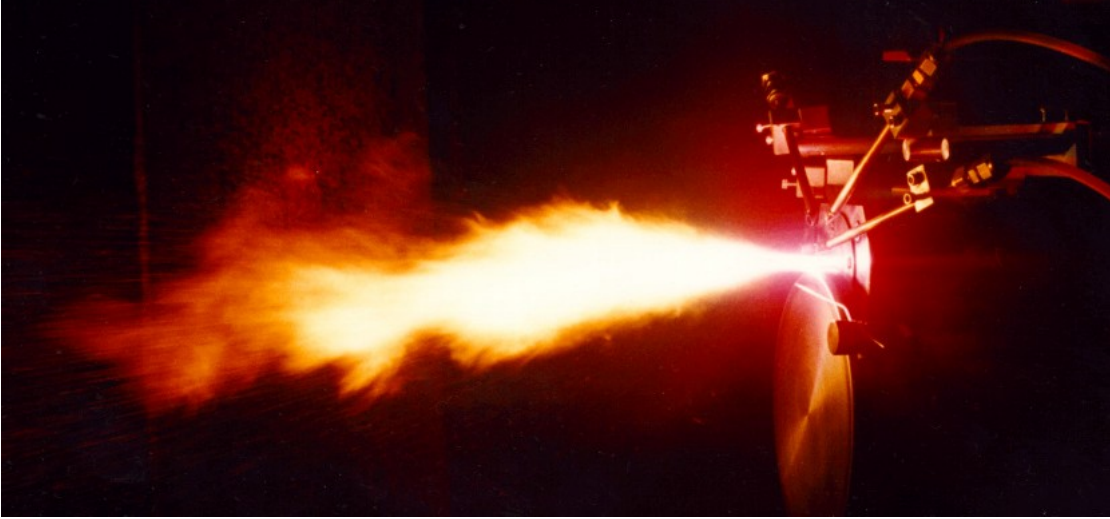


Şekil 3. Plazma Spreyi ile Isıl Bariyer Kaplama İşlem Basamakları

Plazma spreyinde, ardışık damlaların birikimiyle bir depozit yüzey oluşturulur. Temel FDM üretimi; farklı türde malzemelerin (i.e. yoğunluk ve ergime noktaları açısından büyük farklılıkları olan metal ve seramik) arzulan porsiyonlarda homojen olarak, kalınlık eksenine dik düzlemlerde karıştırılmasıdır.

- a. Tek Püskürtücü sistemler: uygulama kolaylığı ve basitliği nedeniyle tercih edilir.
- b. Çok-püskürtücü sistemler: her bileşen için birbirinden bağımsız besleme sistemleri içerir [11].

Bir çok avantajının yanında plazma spreyiyle kaplamanın en önemli dezavantajı, kaplamanın homojen olmayışı, oksitlenme, boşluk veya büyük gözenekler gibi hatalar oluşmasıdır. Bu dezavantajına rağmen artan kullanım ömrü ve bileşenlerinden kaynaklanan malzeme emniyeti ile türbin motorlarında ve dizel motorlarında FDM ile Isıl Bariyer Kaplama geniş uygulama alanlarına sahiptir. Ayrıca bağ mukavemeti, ısı devri, elektrik modülü, oksidasyon direnci gibi kaplama özellikleriyle de endüstriyel uygulamalarda tercih edilmektedir.



Şekil 4. Üç bağımsız toz enjeksiyon çıkışı kullanan Su-Sabitlenmeli-Plazma (WPS: Water Stabilized Plasma Spraying) spreyleme. Şu anda SUNY-Stony Brook'da kirada olan WPS sistemi, Institute for Plasma Physics, Prag, Çek Cumhuriyeti'ne aittir.

Plazma sprey kaplamanın kalitesi ve mukavemeti şu faktörlerle kontrol edilebilir;

- Şekli ve sıkıştırımadaki uzaysal partikül dağılımı
- plazma tabancası enerji seviyesi
- taşıyıcı gazın akış debisi

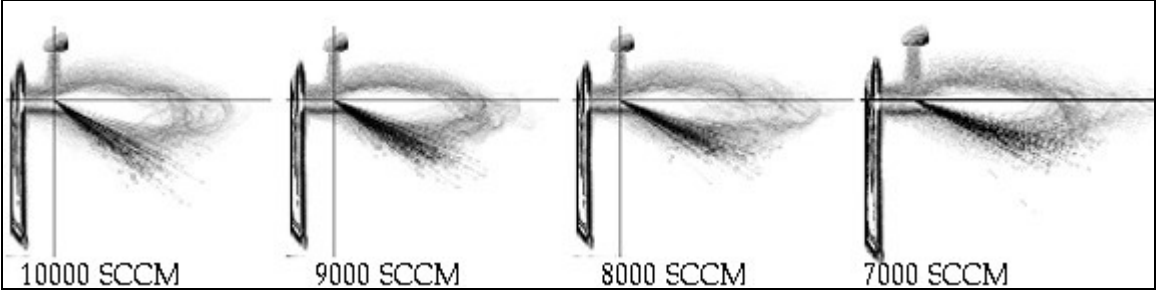
- tane boyut dağılımı
- enjeksiyon yönü.

1.2.1 Plazma tabancası enerji seviyesi

Plazma tabancası enerji seviyesi operatöre aynı zamanda, partiküllerin buharlaşmaması için, plazmanın sıcaklığını ayarlaması olanağını da verir. Eş zamanlı olarak, partiküllerin çoğunluğunun erimeye maruz kalmasından da emin olunmasını sağlar.

1.2.2 Taşıyıcı gaz akış debisi

Taşıyıcı gaz akış debisi, partiküllerin, erimleri için plazmanın içine enjekte edildikleri hızdır. Akış debisi, partikülleri besleme bölgesinden plazmaya itmeye yeterli olmalıdır. Eğer taşıyıcı gaz akış debisi çok düşükse, gaz, besleme tüpünde tozun üzerinden akıp geçecektir ve çok az toz taşıyacak veya hiç toz taşımayacaktır.



Şekil 5. Taşıyıcı gaz debisinin toz akışına etkileri.

Taşıyıcı gaz akış debisinin etkisi yukarıdaki şekilde de açıkça görülmektedir. Her durumda değiştirilen tek parametre, taşıyıcı gaz akış debisidir.

10 000 SCCM'de (Standard Cubic Centimeters per Minute), enjekte edilmiş toz akışı, plazma akışıyla karşılaşır ve yatay olması gereken rotasından belirgin şekilde sapar.

Taşıyıcı gaz debisi azaltılınca, ortalama yataydan olan bağıl açı azalır. 7000 SCCM'nin altına indirilen bir debi ile, enjekte edilen partikül akışı, plazma akışıyla hizalanır.

2500 SCCM değerinin altına inilirse bu kez partiküller, plazmada ilerlemelerine yetecek kadar momentum kazanamazlar ve plazma yüzeyinden ayrılmaya başlarlar. Bu bilgiler kullanılarak, pekçok partikül türü için optimal taşıyıcı gaz debisi belirlenebilir.

Tabanca güç seviyesi ve taşıyıcı gaz debi seviyesi birbirleriyle etkileşim içerisindedir. Genel olarak, tabanca gücünü artırmak, tanelerin her birinin momentum değişimi sebebiyle, enjeksiyon hızının (ve dolayısıyla taşıyıcı gaz debisinin) artırılmasını gerektirir.

Optimal besleme oranları arasındaki fark, tozların plazma içinde ideal olmayan bir şekilde karışmasına veya, toz yörüngelerinde kaymalara, dolayısıyla biriken tabakalarda bant oluşumlara sebep olabilir. Birden fazla toz türünün optimal toz enjeksiyon oranları arasındaki farkı telafi etmek için, partikül boyut dağılımı ayarlanabilir veya enjeksiyon yönü değiştirilebilir.

1.2.3 Tane Boyut Dağılımı

Tane boyutu, plazma spreyleme işlemi için önem taşımaktadır. Çok büyük bir tane boyut dağılımı seçmenin sakıncalarından birisi, daha küçük tanelerin yetersiz momentum sebebiyle plazma akışına girememeleridir. Bu partiküller plazmadan geri sıçrarlar ve kaybedilirler, veya yüzeye erimemiş bir halde gömülürler.

Daha dar bir boyut dağılımına olan gereksinimin ardında, plazma sprey işlemindeki değişkenlerin karşılıklı etkileşimi yatmaktadır. Eğer tozun tamamı tek bir boyutta olsaydı, plazma akışının içine enjekte edilen tanelerin tamamı eriyerek, yüzeye çarpmadan önce, bir süper ısı ve momentuma ulaşırlardı. Oysa gerçekte, taşınan tane boyut dağılımı, 10 ile 90 mikron (ya da fazlası) sınırlarında bir aralığın içindedir. Bunun sonucunda, daha küçük taneler süper ısının daha büyük bir bölümünü oluşturur ve buharlaşırlar; oysa büyük taneler tamamen erimez, bu nedenle biriken yüzeyin mikroyapısında düzenli olmayan bir şekilde sonuç verirler.

Yukarıda bahsedilen problemler, depozit yüzey sadece bir bileşen içeriyorsa çok fazla ciddiye alınmayabilirler. Ancak, birden fazla bileşenden oluşan bir depozit durumu için, özellikle FDM'lerde, küçük tanelerden verilen kayıp ve düzenli olmayan bir mikroyapı, sonuç ürünün performansını büyük ölçüde etkileyecektir.

1.2.4 Tane Enjeksiyon Yönü

Plazma işlem parametrelerini optimize ederken, üzerinde değişiklik yapılması göz önünde bulundurulacak bir diğer değişken de, enjeksiyon bölgesinin konumu ve/veya plazma içine enjekte edilen partikül akışının yönüdür.

Bu teknikler tek-püskürtüclü sistemlerde daha çok kullanılır.

1.3. SHS METODU

Yanma sentezi (combustion synthesis – CS), bir başka adlandırmayla “kendinden yayımlı yüksek-sıcaklık sentezi (self propagating high temperature synthesis – SHS), diğer üretim yöntemlerinden,

- daha yüksek saflıkta ürünler,
- düşük enerji gereksinimleri,
- prosesin daha basit olması

gibi avantajlar sunmasıyla ayrılmaktadır [12].

SHS, FDM üretimi için özellikle uygundur, çünkü yanma işlemi hızlıdır ve daha kalın, net veya yarı-belirgin geometrilerde FDM üretimi sağlamaktadır.

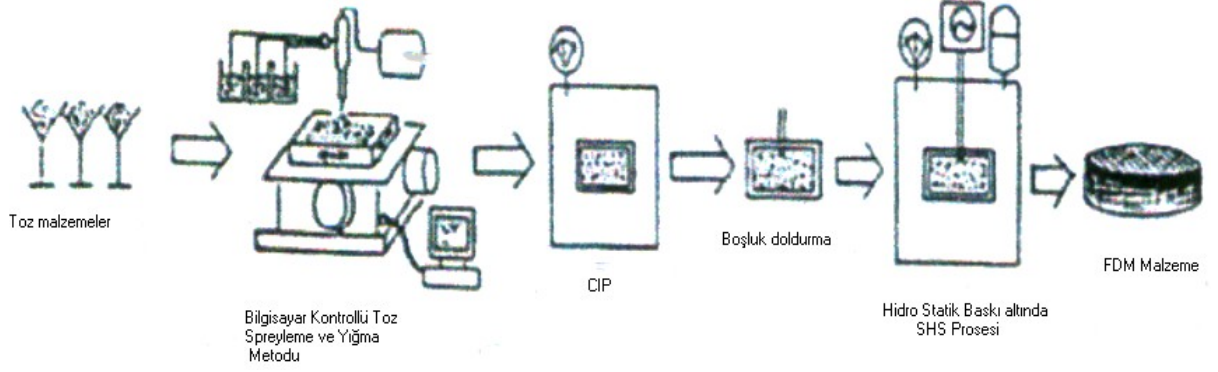
SHS ile FDM üretimi birçok proses içermesine rağmen bu üretim prosesinde iki önemli metot söz konusudur;

1. Toz yığma metodu, ham malzeme tozlarının otomatik spreylene ve yığma ile kompozisyon kontrolü metodudur. Bu metotta bilgisayar kontrolü ile kompozisyon miktarı derecelendirilebilir.
2. Hidrostatik baskı metodu, baskı altında sentez ve şekillendirme tekniğidir.

Otomatik toz spreyleme ve yığma makinesinde metal toz yapının üzerine ham malzeme tozları spreylene ve yığılır. Böylelikle malzeme dizaynı için gerekli dereceli lineer olmayan kompozisyon yapısı oluşturulur olunur. Bu procesten sonra CIP işlemi (Clean in Place Systems) ve vakum ile boşlukları doldurma yaklaşık 200°C’de yapılır. Daha sonra 58MPa su ile hidrostatik baskı uygulanarak malzeme sentezi gerçekleştirilir.

Özellikle bu yöntemle Ti-B-Cu, Ti-C-Ni, Ti-C-Cu sistemlerini içeren FDM'lerin üretimine dair araştırmalar bugün sıklıkla karşımıza çıkmaktadır.

Şekil 6'da SHS yöntemi kullanılarak oluşturulan bir FDM malzemenin işlem basamakları gösterilmektedir [5].



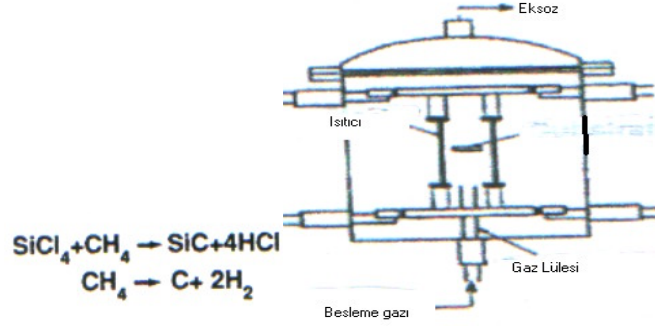
Şekil 6. SHS metoduyla FDM'in üretimi

1.4 CVD FIRINI İLE KARBON/KARBON KOMPOZİTLERİNİN FDM İLE KAPLANMASI

Karbon/Karbon (K/K) kompozitler gaz türbinleri motorlarında ve uzay taşıtlarında yüksek sıcaklık yapı uygulamalarında kullanım alanına sahiptir. K/K kompozitlerin bileşenleri hafiftir ancak oksidasyonları yüzünden bu kompozitler yüksek sıcaklıklara fazla dayanamamaktadırlar. Bu yüzden K/K kompozitlerin yüksek sıcaklık uygulamalarında oksidasyona karşı korunmaları için kaplanmaları gerekmektedir. Ancak geleneksel seramik kaplama bu amaca uygun değildir.

En uygun şekilde CVD (Chemical vapor deposition / kimyasal buhar yığma) fırını yardımıyla K/K kompozitleri kaplama bu uygulama alanında kullanılabilir. K/K kompozitler SiC/C FDM malzemesi ile CVD fırınında besleme gaz oranlarının kontrolü ile kaplanabilir. Bu kaplamalar yüksek sıcaklık süpersonik gaz akış testlerinde çok iyi bir performans göstermektedir.

Şekil 7'de CVD fırınında K/K kompozitlerinin kaplanması şematik olarak gösterilmektedir [5].



Şekil 7. CVD Fırınının Sistematik Diyagramı

1.5. PERVANE KURU KARIŞTIRMA

FDM'leri üretmede bir yöntem de IDB (Impeller Dry Blending) yöntemidir [6]. Çeşitli düzenli-derecelenmiş FDM'lerin fabrikasyonu için kontrollü IDB prosesi Sydney Üniversitesi tarafından geliştirilmiştir. IDB yöntemi şu özellikleriyle anılmaktadır:

- Düşük maliyet
- Oldukça yüksek hızlarda işlem hacmi (yüzlerce gr/dak.)
- Eni boyunca milimetreden santimetreye dek çeşitli derecelenmeler
- Düzenli ve sürekli olmayan (tabakalanmamış) dereceler de elde edilebilmektedir.

1.5.1 Kontrollü Ayırım

Bulk FDM'lerin fabrikasyon işlemleri üzerine birçok laboratuvar raporu yayımlanmıştır. Bu yaklaşımların çoğunluğu, bir çeşit kontrollü ayırım içermektedir. Kontrollü ayırım, metal ve seramik taneleri karışımını, yoğunluk esasına dayanan dereceli bir profile ayırmaktır. Segregasyon derece kontrolü zayıf ve yavaş bir işlemdir, çünkü ayırım oranları kullanılan spesifik ham maddelerin tanecik boyutu ve morfolojisine oldukça bağlıdır. Bugüne değin bulk FDM'ler hakkında yayımlanan makalelerin çoğu ayırım yaklaşımını içermiştir, örneğin sedimentasyon oluşturma, savurma (santrifüj) döküm gibi.

1.5.2 Kontrollü Karıştırma

Kontrollü karıştırmada 2 FDM bileşeni, bileşen 1'in %100 bulunuşundan %1'e ve böylece %100 2. bileşene doğru sürekli olarak değişmesi için karıştırılır. Bu yaklaşım oldukça iyi kontrol edilen, toz yoğunluğu ve yerçekimsel yerleşme ayarları gibi sisteme bağlı etkenlerden bağımsız olan düzgün fonksiyonel dereceler elde etmenin biricik avantajını sunar. Ayrıca, segregasyona oranla, kontrollü karıştırma oldukça yüksek işlem hızları sağlar.

Günümüzde, kontrollü karıştırma en çok FDM ince filmleri elde etmede kullanılmaktadır.

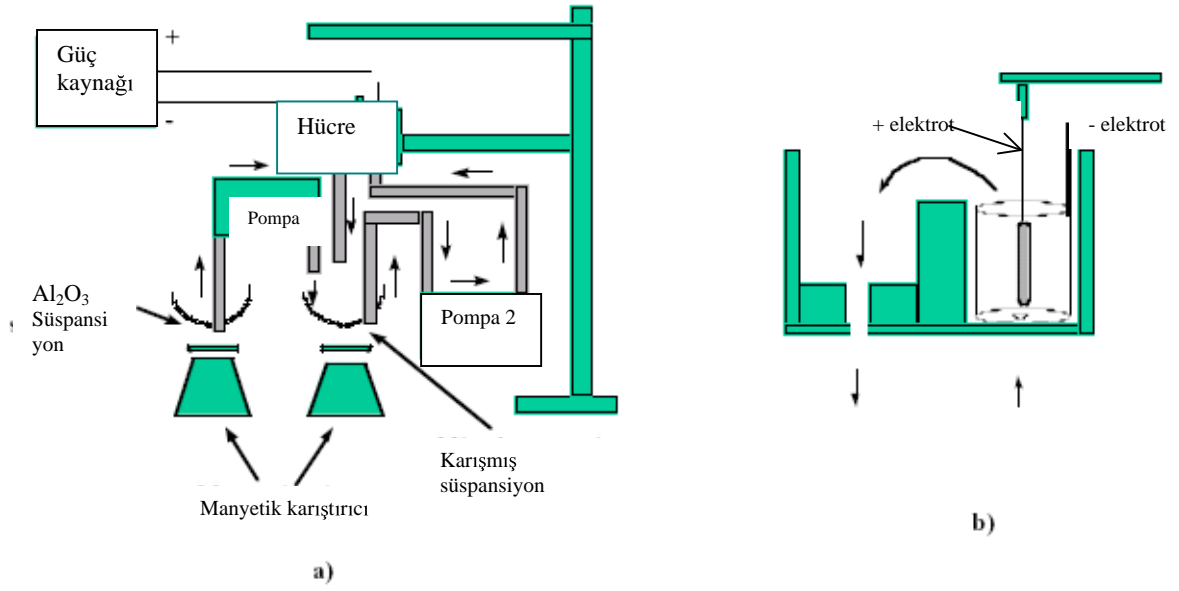
2. YAŞ METOD

2.1. ENDÜKSİYONLA YIĞMA (EPD)

FDM'ler, elektroforez biriktirme (electrophoresis deposition- EPD) ve basınçsız sinterleme ile de üretilmektedir [13]. 1970'li yıllarda Sodyum-sülfür hücrelerinde elektrolit olarak kullanılmak üzere beta-alumina seramiklerine şekil vermek amacıyla EPD sıklıkla kullanılmıştır. Geleneksel seramik işleme yöntemleriyle şekil vermesi zor olan seramiklerin üretiminde EPD, basit, hızlı ve güvenilir bir teknik olduğunu kanıtlamıştır [14].

Bu yöntemde, birikme sırasında süspansiyonun bileşimi dinamik olarak değiştirilerek malzemenin derecelendirilmesi elde edilebilir.

Endüksiyonla Yığma (EPD) yöntemi bütün bu üretim tekniklerinden en düşük maliyete sahip olan ve kompleks geometriyle sürekli malzeme üretebilen bir prosestir.



Şekil 8. EPD işleyiş şeması. a) süspansiyonun karıştırılması ve sirkülasyonu, b) biriktirme hücresinin yan kesiti.

Şekil incelenirse, EPD sisteminin,

- silindirik elektrotlardan oluşan bir biriktirme hücresi,
- 2 numaralı pompa tarafından sağlanan süspansiyon sirkülasyon sistemi,
- her 2 süspansiyonun manyetik olarak karıştırıldığı bir karışım hücresi,
- karışım hücresine 2. süspansiyonu sürekli aktaran bir besleme sisteminden oluştuğu görülebilir.

Birikim sırasında, karıştırılmış süspansiyon, şekilde görülen oklar yönünde ilerler. Birikme hücrelerinden geçerken, çelik tel elektrot (anot) üzerinde bir malzeme katmanı birikir.

- Başlangıç olarak, ticari yönden sağlanabilir metal tozlar alınır.
- Çeşitli yüzdelerde aseton, n-butilamin, polivinilasetat içeren sıvı süspansiyonlar hazırlanır.
- 2 adet paslanmaz çelik elektrot içeren, politetrafloroetilen (PTFE) malzemesinden yapılmış bir biriktirme hücresi kullanılır. Elektrotların yüzeyleri kurşun kaplamalıdır, bu da depozitin elektrottan ayrılmasını sağlamak içindir.
- Elektrotların yüzey alanı ve birbirlerine olan mesafeleri bellidir.
- İşlem sırasında sabit gerilim uygulanır.
- Birikim, manyetik olarak sürekli karıştırılan süspansiyondan başlar.
- Birikme hücresinin içine negatif yüklü elektrot sabitlenmiştir.

- 10 dakika birikme yapıldıktan sonra, ilk süspansiyonunun yerini aynı miktarda saf diğer süspansiyonu almıştır. 10 dakika da bu kalan süspansiyon kullanılır.
- İşlem bittikten sonra ürün kurutulur ve elektrottan ayrılır.
- Ürün 450 °C’de 1 saat süreyle ısıtılır ve içindeki organik bağlayıcı yanarak atılmış olur.
- 1450 °C’de 1 saat boyunca sinterlenir.

Bu yöntemle seramik/seramik, ZrO_2/Al_2O_3 ve seramik/metal, WC-CO kompozitleri oluşturulabilir.

2.2. SLİP DÖKÜM

FDM’e uygulanabilen çok iyi bir döküm tekniğidir. Çok iyi bir yöntem olmasına rağmen alçı taşı kalıp kullanımında dezavantajlara sahip olduğundan kullanılan kalıp büyük bir önem taşımaktadır. Bu dezavantajlar şu şekilde sınıflandırabiliriz;

- $CaSO_4$, FDM malzemesine karışmaktadır.
- Sürekli üretimde döküm oranının azalmasıyla kalınlık kontrolü zorlaşmaktadır.
- Dökümdeki kurutma zamanı düşük verime neden olmaktadır.

Son zamanlarda gözenekli reçine kalıplar kullanılarak bu üç dezavantaj ortadan kaldırılmıştır.

Bu yöntemle 3Y-TZP/SUS304 FDM hazırlanabilir.

3. MİLİMETRİK – DALGA HUZMESİ METODU

Milimetrik-Dalga Huzmesi ile üretim işleminin amacı, kaplama maddelerinin hacimsel ve kontrollü ısıtılması için şiddetli milimetrik-dalga radyasyonunda kullanılan fonksiyonel derecelendirilmiş kaplamaların fabrikasyonunda yeni bir yöntem geliştirmek ve yüzeyleri, şiddetli milimetrik-dalga huzmesi metoduyla üretilen malzemelerin fiziksel temellerini araştırmaktır.

Son yıllarda FDM’in elde edilebilmesi için; ısıl sprej işlemi, toz metalürjisi, kimyasal ve fiziksel buhar ayrıştırması, özyayımlı yüksek sıcaklık sentezi, termal difüzyon işlemi gibi imal yöntemleri denenmiş ve araştırılmıştır. Bütün bu yöntemlerde ortak olarak

karşılaşılan en büyük sıkıntı ise kaplayıcılardaki artık ve ısı gerilimlerin minimize edilmesinde ortaya çıkar.

Projenin başlatılmasındaki ana hedef, milimetrik-dalga mesafesindeki elektromanyetik dalga enerjisinin seçilebilir ve kontrollü ayrışmasıyla düşük ısı ve artık gerilimli fonksiyonel derecelendirilmiş kaplamaların oluşturulmasıdır. Şiddetli milimetrik-dalga huzmesi metodunun en önemli avantajı; milimetrik-dalga radyasyonunun kaplamanın iç kısmında iç emiliminin kontrol edilebilmesidir. Yüzeyden itibaren ısıtmaya dayalı çoğu ısı işlemin tersine, milimetrik-dalga huzmesi metodu FDM yığınındaki enerji ve sıcaklık dağılımını kontrol edebilme imkanını sağlar. Mikrodalga enerjisi emiliminin bileşime dayalı seçilebilirliği, kaplama kalınlığı boyunca amaca daha uygun bir mikro yapı oluşturan ve yüksek ısı gerilimleri önleyen işlevsel ısı dağılımlarını sağlar.

Bu özelliğiyle, milimetrik-dalga huzmesi işlemi gelişmiş enerji dağılımı özelliğiyle diğer üretim metotları için engel teşkil eden ısı yayılma düzensizliği sorununu çözer.

Çoğu malzemelerin mikrodalga emilimi dalga frekansı ile artarken, milimetrik-dalga radyasyonu (30 GHz ve daha yüksek frekanslar için) sayesinde verimli ve kontrollü ısıtılabilen malzemelerin ve buna bağlı olarak milimetrik-dalga huzmesi metoduyla üretilen fonksiyonel derecelendirilmiş kaplamaların kullanımı, daha çok kullanılan 915 MHz ve 2,45 GHz mikrodalga radyasyon frekanslarına oranla artar. Bunun sonucunda, özellikle mikrodalgalar için geçirgen olarak kabul edilen ve oksit, geçiş elementleri ile nitrit bazlı ateşe dayanıklı (refractive) malzemeler verimli olarak milimetrik-dalga radyasyonu ile ısıtılabilirler.

Çalışma esnasında projeden beklenenler ve sonuçları şunlardır:

- Milimetrik-dalga metoduyla fonksiyonel derecelendirilmiş kaplamalar hakkında bir teknoloji geliştirilmesi ve bilgi edinilmesi; fonksiyonel derecelendirilmiş kaplamaların üretimi için yeni bir yöntem olan ve hacimsel ısıtma imkanı veren milimetrik-dalga işlemlerinin geliştirilmesi hedeflenmiştir.

Projenin amacı yüksek-sıcaklık uygulamaları için fonksiyonel derecelendirilmiş kaplamalar olsa da bu yöntemin aynı zamanda elektronik ve biyomedikal sahada da kullanılabileceği görülmüştür.

- Milimetrik-dalga araçlarının, şiddetli elektromanyetik dalgalarla malzeme yüzeylerinin işlenmesi için kullanımının sağlanması ve geliştirilmesi; gaz türbin kanatlarının test numunelerinde ısı bariyer kaplamaların denenerek bu alanda milimetrik-dalga işleminin uygulanması ve geliştirilmesi amaçlanmıştır.

Projenin tamamlanmasıyla proje için öngörülen teknoloji gelişimi gerçekleştirilmiş, proje süresince geliştirilen milimetrik-dalga işlem araçları, sanayi ölçekli jirasyon sistemleri için bir prototip olmuş ve bu teknoloji sanayide kullanıma hazır hale gelmiştir.

Mikrodalga enerjisinin yüksek sıcaklık işlemlerinde kullanımı enerji ve işçi maliyetlerinde tasarruf, üretimde artış ve çevresel atıklarda azalma sağlar. Örneğin, seramik sinteri için kullanılan özgül enerji, geleneksel yöntemle oranla bir merteye azalmaktadır. Fakat bu metodun sağladığı en belirgin ekonomik yarar diğer yöntemlerle ulaşılamayan performansa ve verimli özelliklere sahip fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin elde edilebilmesidir [15].

4. FDM'İN KULLANILDIĞI ALANLAR

4.1. Uzay Taşıtları

FDM ilk bu alan için tasarlanmıştır. FDM yapısal malzeme ve enerji değiştirici malzeme olarak roket yapılarında ve motorun dış duvarında uygulanmaktadır.

Uzay istasyonu Kibo'da test cihazı için FDM bir fişek olarak ve geri kullanılabilir bir roket motoru olarak kullanılmıştır. Tüm bu çalışmalar sistemlerin geri kazanılması üzerinde yoğunlaşmıştır, çünkü çoğu ulus geri kullanımlı roketler ve uzay mekiği üzerinde çalışmalarını sürdürmektedir. Ancak bu çalışmalar daha model üzerinde sürdürülmektedir.

İleri Uzay Teknolojileri A.Ş. elektroform teknolojisinde uygulanacak içten yanmalı motorların üretimi ve geliştirilmesiyle ilgili olarak yanma odası elektroform tekniği potansiyelini ispat etmiştir.

4.2. Endüstriyel Malzemeler

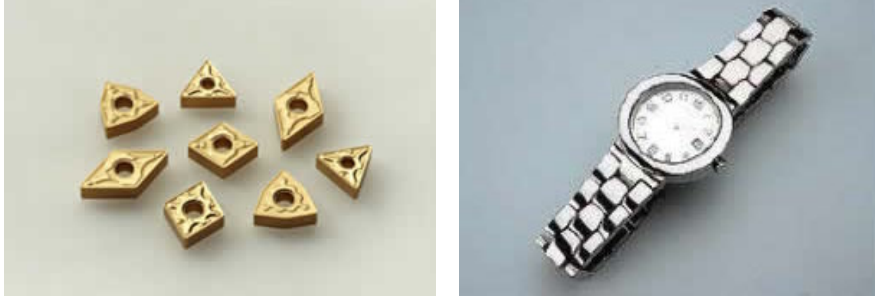
Mukavemet ve ısı dirençlerinin artması nedeniyle kesici ve şekillendirici kalemler için FDM uygulanması başlatıldı. Bu çalışmalarda kendi kendini yağlama fonksiyonu ve

yüksek ısı dirençlerin kalemler için geliştirilmesi yanında, kesici yağı kullanmadan kuru kesim yapabilme kabiliyeti geliştirildi.

Mitsubishi Material Corp, UE6020 koduyla katlı CVD malzemesini üretti. Bu malzeme FDM'in yapısını benimseyen dereceli yüzey yapısına sahiptir. Sumitomo Elektrik Endüstriyel Ltd. FDM tekniğini karbit kalemlerinde kullanmaktadır. Diğer çeşitli uygulamalarda mümkündür. Örneğin, dereceli kompozit karbit/çelik bağlantılı malzeme plastik üretimle (delme, dökme, kalıplama..) kalemlerde uygulanabilir.

4.3. Titanyum Saatler

Hafif ve alerjik özellik göstermediği için titanyum kol saatlerinde kullanılır. Dezavantajı ise, düşük sertlik ve düşük darbe direncidir. Böylece H₂O içeren atmosferik gaz ve düşük basınç altındaki ısı transferindeki yüzey kalitesinin geliştirilmesi için yeni bir metot geliştirilmiştir. Bu teknikle yüzey tabakasının korunarak sertleştirilmesi başarılmıştır. Citizen 'Aspec' adı altında titanyumdan oluşturulmuş sert yüzeyli yeni bir marka saat satmaya başlamıştır.



Şekil 9. Mitsubishi Materials Corp'un Üretimi Kalemler ve Citizen'in Duratect-Titan Saati [1]

4.4. Optoelektronik

FDM'in plastik optik fiberlerdeki uygulaması, iletimin hızını ayarlayarak ev halkının görsel iletişimini mümkün hale getirmektedir.

Asahi Cam Firması, haziran 2000'den beri izotop içerikli dereceli optik telleri Lucina TM' i kullanmaktadır.

Günümüzde, Lucina TM 10 Gbps'i aşan yüksek hızda bilgi iletim boyutu kullanmaktadır. Bu boyut 200000 telefon bağlantısına ve birkaç yüz metre iletim

uzaklığına eşittir. Gelecekte, hastanelerde ve okullarda bu iletim sistemi başarıya ulaşacaktır.



Şekil 10. Asahi Cam Firmasının İmalatı Dereceli İçeriğe Sahip Cytop TM Optik Tel [1]
4.5. Enerji Malzemeleri

Çevre sorunlarını listelersek en büyük problemler; CO₂ gazlarının birikmesi, ozon tabakasının delinmesi ve çöplerin yığılmasıdır. Bu atıkların kullanılması için Termoelektrik Güç Üreticileri kullanılmaktadır. Bu Güç Üreticilerindeki yüksek ve düşük sıcaklık bölgeleri için FDM uygulamaları başlamıştır.

4.6. Biyomalzemeler

Vücudumuz 206 kemik tarafından desteklenmektedir ve kemiklerin bazıları beyni ve iç organları korumaktadır. Böyle bir hayati görevi gerektiğinde üstlenebilen bir malzemeye ihtiyaç vardır. Büyük araştırmalar sonucu kemik ve eklem yerine geçen yeni bir malzeme olarak FDM bulunmuştur. Mükemmel sertlik ve korozyon direnci için yeterli olmasa da biyolojik bütünlük ve zararsızlık için, suni kemik, eklem ve diş olarak FDM uygulanabilir.

Kanseri önlemek için de FDM üzerinde çalışmalar sürdürülmektedir. Şekil 11, deney tavşanında uygulanan FDM malzemesi görülmektedir [15].



Şekil 11. Tavşanda FDM Uygulaması

4.7. Güç İletimi ve Dağıtım Sistemi

Bu sistemde, FDM teknolojisi devir frenleyici, bağlantı kesici ve yıldırım durdurucu içeren kompleks bir anahtar olan gaz yalıtım anahtarı için kullanılır.

Güç ve Endüstriyel Sistem Araştırma ve Geliştirme Merkezi, Tohiba Corp, kristal yapıya sahip dereceli bir elementten yıldırım durdurucu üretmiştir. Bu elementte dışarıdan içeriye ısıl gerilme kontrolünü anlamak ve enerji emme kabiliyetinde önemli gelişmeler elde etmek mümkün olmuştur.

4.8. Beyzbol Ayakkabısı (Cleats)

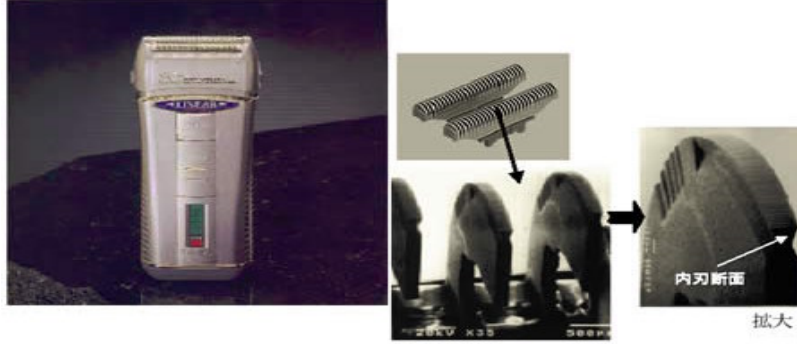
FDM kullanılmadan önce, ayakkabılar kil ve kumdan dolayı aşınıyor ve kopuyordu. Bu sorununu çözebilmek için FDM uygulanmaya başlanmıştır. FDM tekniği aynen çelik kalemlerde kullanıldığı gibi beyzbol ayakkabısı için de kullanılmaktadır. Bu ayakkabılar, özel şekilli karbit alaşımlarının yapışmasından ve karbon çeliklerinden yapılır. Mizuno Ltd. bu ayakkabıları satmaktadır.



Şekil 12. Mizuno Üretimi Baseball Cleats [1]

4.9. Tıraş Makinesi Bıçağı

Matsushita Elektrik Çalışanları, dereceli sertlikte tıraş makinesi bıçağını başarılı şekilde ticarileştirmiştir. Alt tabaka yüksek mukavemet ve tokluk için paslanmaz malzemedен, üst tabaka yüksek sertlik için intermetalik malzemedен imal edilmiştir. Böylece düzgün ama keskin ve derin tıraş sonucu ortaya çıkmıştır.



Şekil 13. Matsushita Elektrik Çalışanları, Ltd. Tıraş makinesi [1]

4.10 Türbinler ve Dizel Motorlar

Son 30 yıldır, ısı bariyer kaplamalar gaz türbinleri ve diğer enerji üreten elemanlarda, şu amaçlarla kullanılmaktadır [11]:

- Motorun çalışma sıcaklığını yükseltmek ve böylece enerji verimini iyileştirmek
- Motorun sıcak bölümlerinde bulunan metalik elemanların soğutma gereksinimlerini azaltmak
- Eleman ömrünü uzatmak.

Isıl bariyer kaplamalar, rutin olarak yanma odalarında, art yakıcılarda, ve bazı durumlarda türbin nozulları ve hava araçlarının bıçaklarında, ve güç üreten gaz türbinlerinde kullanılmaktadır. Son zamanlarda, yakıt tüketimini azaltmak amacıyla düşük ısı atan dizel motor elemanlarında ısı bariyer kaplamalara olan ilgi artmıştır.

Enerji üreten gaz türbinleri ve dizel motorların, yükseltilmiş sıcaklıklarda daha yüksek verimlerle çalıştıkları anlaşılmıştır. Örnek olarak, bir gaz türbin giriş sıcaklığında 100°C'lik bir artış, %8'den 13'e yükselen bir güç çıkışıyla sonuçlanmaktadır. Sadece türbin yakıtları için yıllık 14 milyar dolar örneğini ele alırsak, verimdeki %1 artış güç üretim maliyetlerinde 140 milyon dolar kazanç sağlamaktadır.

Dizel motorları için, silindir kafasındaki 1 mm kalınlığındaki ve piston başlıklarındaki 2 mm'lik kaplamaların, su soğutucusundaki ısı kayıplarını %9 oranında azalttığı, yakıt içine giden ısı kayıplarını %3 artırdığı, toplam olarak %6 azaltma yaptığı bildirilmiştir [16].

SONUÇ

1959 yılı Nobel fizik ödülü sahibi Richard Feynman'ın sözünü ettiği “Gelecekte belki de atomları tek tek istediğimiz düzende yerleştirmemiz mümkün olacak” şeklindeki ifadesi nanoteknoloji yöntemleri kullanılarak FDM üretiminin gerçekleştirilmesi ile birlikte gerçeklik kazanmıştır. Diğer bir deyişle Prof. Feynman'ın düşünü kurduğu ve bilim adamlarının sınırsız bir özgürlükle tek tek atomları istedikleri düzende yerleştirebilecekleri “o uzak gelecek” artık bir düş olmaktan çıkmış ve gerçek haline gelmeye başlamıştır.

FDM çalışmalarına başta Japonya olmak üzere Amerika büyük ilgi göstermiştir. 80'li yıllardan itibaren yapılan birçok araştırma ve geliştirme projelerinde FDM'in sıradan malzemelere göre üstünlüğü kanıtlanmıştır.

Çalışmaların ana konusunu daha mükemmel kompozisyona sahip olan FDM'i oluşturmak adına üretim teknikleri oluşturmaktadır. Yapılan çalışmalar göstermektedir ki;

Toz metalurjisi yönteminde uygulanan işlem adımları esnek, etkin, düşük maliyetli ve çevreye zararsızdır. İstenilen mikro yapıda, fiziksel ve mekanik özelliklerde malzeme üretimine imkan veren bu yöntemle eşsiz özelliklerde ve neredeyse sınırsız sayıda

geleneksel malzemelerden daha farklı alaşım ve kompozit malzeme üretmek mümkündür. T/M prosesi FDM için uygun ve sürekli uygulanabilir bir yöntemdir.

Sistemin ısı verimliliğini artırarak çalışma sıcaklığını yükseltmek ve korozyon, oksitlenme veya aşınmayı önlemek amacıyla ısı bariyer kaplama yöntemi kullanılır. Bu yöntemde, yapıştırma ile birleştirilen malzemeler arasındaki ısı genleşme katsayısı uyumsuzlukları nedeniyle oluşan ısı gerilmeleri azaltabilmek için dereceli değişen FDM'den yapılmış kaplamalar tercih edilmektedir.

Endüksiyonla Yığma (Electrophoretic Deposition-EPD) yöntemi bütün bu üretim tekniklerinden en düşük maliyete sahip olan ve kompleks geometriyle sürekli malzeme üretebilen bir işlemdir.

Pervane Kuru Karıştırma (IDB) yöntemi ise, oldukça yüksek hızlarda işlem hacmi sağlamaktadır.

Anlatılan tüm üretim tekniklerinde ortak olarak karşılaşılan sıkıntılar, malzeme bünyesinde makroskopik boyutta bir birleşme söz konusu olmadığı için ısı gerilmelerin kısmen kontrol edilebilmesi ve kaplayıcılardaki artık ve ısı gerilimlerin azaltılamamasıdır. Elektromanyetik dalga enerjisinin seçilebilir ve kontrollü ayrışmasıyla gerçekleşen düşük ısı ve artık gerilimli fonksiyonel derecelendirilmiş kaplamalar, Milimetrik dalga huzmesi metodu ile gerçekleştirilmektedir. Yüzeyden itibaren ısıtmaya dayalı çoğu ısı işlemin tersine, milimetrik-dalga huzmesi metodu FDM yığımındaki enerji ve sıcaklık dağılımını kontrol edebilme imkanını sağlar. Bu özelliğiyle, milimetrik-dalga huzmesi işlemi gelişmiş enerji dağılımı özelliğiyle diğer üretim metotları için engel teşkil eden ısı yayılma düzensizliği sorununu çözer.

KAYNAKLAR

1. www.scientific.net/Functionally_Graded_Materials_FGMs.htm
2. Put,S., Vleugels, J., Anne, G. and Biest,V.D., “Functionally Graded Ceramic and Ceramic-Metal Composites Shaped by Elektrophoretic Deposition”, *Colloids and Surfaces A*
3. Miyamoto, Y., Kayser, W.A., “Functionally Graded Materials Design, Processing and Applications”, Kluwer Academic Publishers, Boston, 1999
4. Ichikawa, K., “Functionally Graded Materials in the 21st Century”, Agency of Industrial Science and Technology, MITI, Ibaraki, Japan
5. Koizumi,M., “FGM Activities in Japan”, *Composites Part B*, 288, 1997, 1-4
6. Ruys, A., Sun, D., “Functionally Graded Materials (FGM) and Their Production Methods”, <http://www.azom.com/details.asp?ArticleID=1592>
7. Ruiz-Navas, E. M., Gordo, E., Garcia, R., “Development and Caharacterization of 430L Matrix Composites Gradient Materials”, *Materials Research*, Vol. 8, No. 1, pp. 1-4 (2005)
8. 9.th Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi Bildiriler Kitabı, Cilt 1,11-15 Haziran 1997, Türk Mühendis ve Mimar Odaları Birliği,Yayın No:33
9. Kawasaki, A. and Watanabe, R., “Concept and P/M Fabrication of Functionally Gradient Materials”, *Ceramics International*, 23, 1997
10. “Plasma Sprayed Functionally Graded ZrO₂/NiCoCrAlY Thermal Barrier Coatings”, www.ntu.edu.sg
11. Pindera, M-J., Paulino, G.H., “An Overview of Pre-Nominated Session P35 on Functionally Graded Materials”, <http://www.matscieng.sunysb.edu/tsl/fgm/fgm.html>
12. Zhang, X., H.; Han, J., C., “Combustion Synthesis and Thermal Stress Analysis of TiC-Ni Functionally Graded Materials”,
<http://www.paper.edu.cn/scholar/download.jsp?file=hexiaodong-5>
13. Zhao, C., Vleugels, J., Vandeperre, L., “Graded Tribological Materials Formed by Electrophoresis”, *Materials Science Forum*, Vol. 308-311, pp. 95-100 (1999).
14. Powers, R. W., *Journal of Electrochemical Society*, 122, p. 490 (1975).
15. www.ntu.edu.sg/mpe/Research/Programmes
16. Kvernes, I., Noerholm, O.; “Coatings for Advanced Heat Engines Workshop”, DOE, Washington D.C., pp. II-73 (1987).