

makale

Hikmet ALAGÖZ *
Müfit GÜLGEÇ *
Aylin KONEZ *

Gazi Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi
Makina Mühendisliği Bölümü

FONKSİYONEL DERECELENDİRİLMİŞ MALZEMELER VE KULLANIM ALANLARI

GİRİŞ

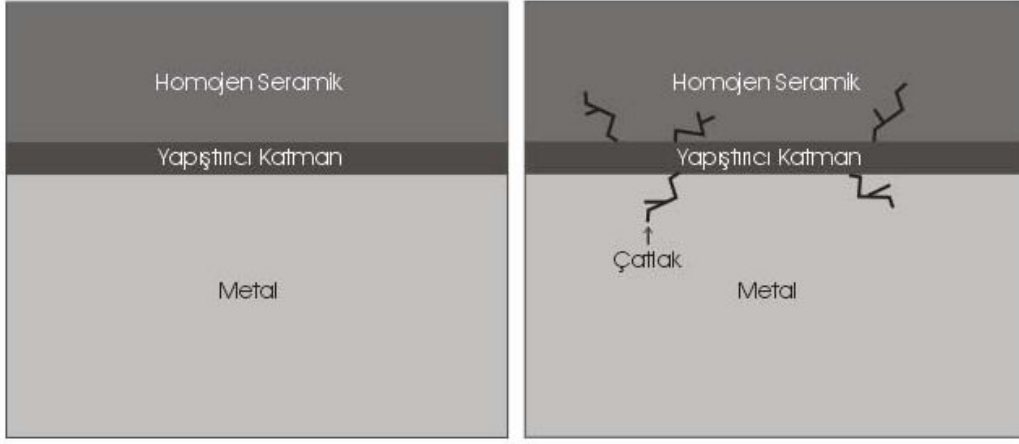
Doğada çoğu zaman bir halden diğer bir hale direkt geçişler sorun çıkarmaktadır. Bunun yerine, durumlar arası geçişler kademeli yapılarak olumsuzluklar azaltılmaya çalışılır. Fırtına öncesi esen rüzgar veya sel öncesi çiseleyen yağmur, doğada olumlu kazanımları olan kademeli geçişlere örnek verilebilir.

Benzer olarak, teknolojinin gelişimiyle birlikte yeni tür bazı ihtiyaçların karşılanabilmesi için malzemelerde de homojen olmayan kademeli veya devamlı değişen bir yapıya ihtiyaç duyulmuştur. FDM'lerde (Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemeler) buna benzer olarak birbirleri ile birleştirilmiş, fiziksel ve kimyasal olarak birbirlerinden farklı özellikler taşıyan iki madde arasında farklı ısıl genleşme katsayılarından dolayı oluşan ısıl gerilmeleri derecelendirilmiş yapılarıyla azaltır, iki madde arasındaki fiziksel ve kimyasal özelliklerdeki ani değişimlerden dolayı meydana gelebilecek diğer olumsuzlukları da minimuma indirirler. Özellikle yüksek sıcaklık uygulamaları, uzay araçları, mikroelektronik ve endüstriyel uygulamalar FDM kullanımının yaygınlaşmaya başladığı alanlardır. Geçmişte bu ihtiyaçların karşılanabilmesi için çalışmaların çoğu kompozitler, alaşımlar, yarı iletkenler, kaplamalar ve ince film kaplamalar gibi malzemelerin imal edilmesi üzerine yoğunlaşmıştır. Diğer yandan optimal bir dizayn için, bileşenlerde ve yapılarda homojen olmayan malzemelerin kullanılmasının kaçınılmaz olmasıyla birlikte, değişken özelliklere sahip malzeme veya malzeme sistemleri kullanılarak sistemin çalışma sıcaklığı yükseltilmiş, malzemenin sağlamlık, tokluk, korozyon dayanımı gibi özelliklerinin artırılması sağlanmıştır[3]. Buna benzer malzemelere doğadan yumuşak dokusu olan bitki ve hayvanlar, kendi vücudumuzda ise iskelet ve dişler örnek verilebilir. Bambu, kabuk ve hindistan cevizi yaprağı basit örneklerdir. Bambu ve kabuk dış yüzeyinde yüksek mukavemet, iç yüzeyinde ise yumuşak ve dayanıklı yapıya sahiptirler. Ayrıca bambuda merkezden boşluğa kadarki basamaklı yapı sayesinde bu bitkide mukavemet ve elastikiyet özellikleri bir arada görülür. Hindistan cevizi yaprağı rüzgara kapıldığı zaman %30'u rüzgarın estiği doğrultuda serbest hareket eder, %70'i ise çok serttir ve asla hareket etmez [4].

Bu çalışma ile fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin tanımının yapılması, FDM'lere gereksinim oluşturan olumsuzlukların ve FDM'lerin bu olumsuzluklara karşı ürettiği çözümlerin genel bir tespiti hedeflenmiştir. FDM'lerde uygulamada karşılaşılan sorunlar, FDM'lerden yararlanılan alanlar, FDM ürünlerine örnekler bu çalışmada incelenilen diğer konu başlıklarıdır. Ayrıca günümüzdeki FDM çalışmalarının anlaşılabilmesi için bu teknolojide dünya lideri olan Japonya'daki FDM çalışmaları da bu makalede incelenmiştir.

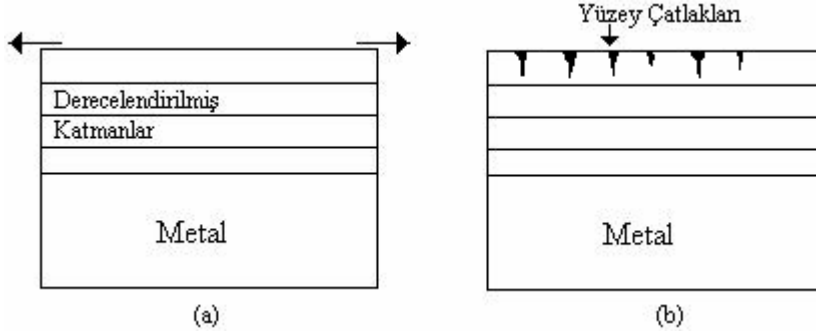
FDM NEDİR VE FDM'İN ÇIKIŞ SEBEPLERİ

Isıl proseslerde dikkat edilmesi gereken önemli noktalardan biri; prosesin gerçekleştiği ortamı çevreleyen maddenin yüksek ısıdan olumsuz etkilenmesini önlemektir. Bu amaçla yüksek sıcaklığa maruz kalan malzeme, yüksek sıcaklığa karşı direnç gösterebilen bir malzeme olan seramikle kaplanmaktadır. Termal bariyer olarak adlandırılan bu sistem, beraberinde bazı sorunları da getirmektedir.



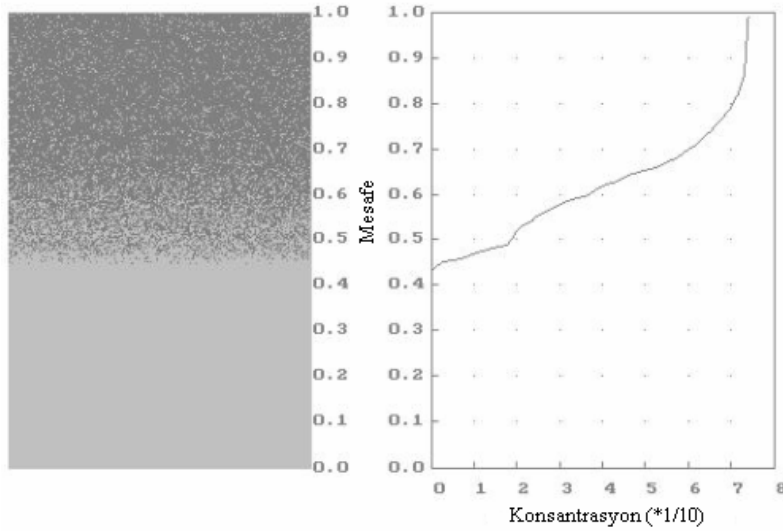
Şekil 1: Homojen seramik kaplamanın şematik gösterimi (a) ve kaplamada kırılmaların oluşumu (b).

Termal bariyer uygulamalarında yüksek sıcaklığa maruz kalan homojen seramik ve metalin termal genişleme katsayılarındaki yüksek uyumsuzluk nedeniyle bağlanma bölgesinde termal gerilmeler ortaya çıkar, sonuçta arayüz çatlakları ve kırılmalar meydana gelir (Şekil 1). Ayrıca yüksek sıcaklığa ilk maruz kalan kaplamanın en üst yüzeyinde de yüzeye dik kenar çatlakları görülmektedir (Şekil 2). Bu çatlakların oluşmasında rol oynayan gerilim kaplamanın en üst yüzeyindeki yarıçap yönündeki yatay gerilimdir [3].

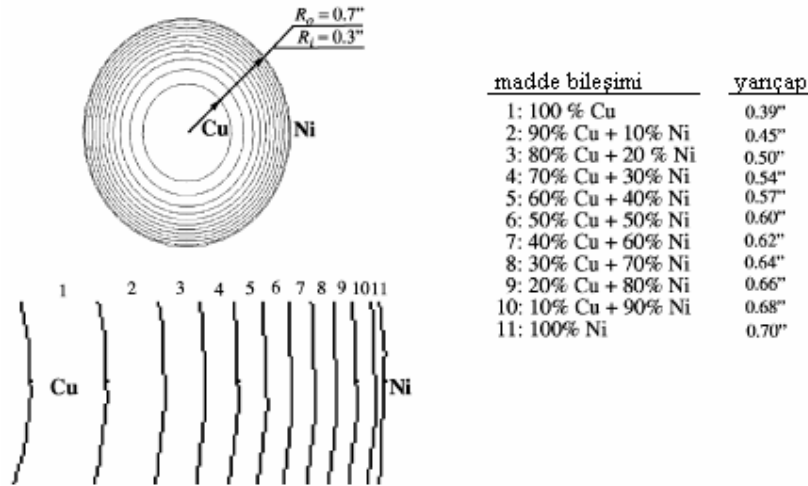


Şekil 2: (a)Kaplamanın üst yüzeyindeki yatay gerilmeler, (b) Yatay gerilimlerden kaynaklanan ve kaplamanın üst yüzeyine dik olarak oluşan kenar çatlakları

Bu uyumsuzlukları minimuma indirmek, dolayısıyla ısıl gerilmeleri azaltmak amacıyla fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler kullanılmaktadır. Bu malzemelerdeki dereceli yapı (Şekil 3) metali korozyon, oksidasyon veya aşınmaya karşı korumanın yanında, homojen seramik kaplamada oluşan kırılmaları, arayüz ve yüzey çatlaklarını da minimuma indirmektedir. İhtiyaca ve seçilen üretim tekniğine bağlı olarak FDM'lerde dereceli yapı tabakalı veya devamlı derecelendirilmiş olabilmektedir (Şekil 3-4-5). Tabakalı derecelendirilmiş kaplamalar teknik olarak yarı kompozit, sürekli olmayan termomekanik özelliklere sahip birbirinden farklı homojen malzemeler içerir [3].



Şekil 3: SiC/A356 FDM’inde kuvvetlendirici parçacıkların devamlı derecelendirmesi [5].



Şekil 4: Michigan Üniversitesinde Cu ve Ni bileşenleriyle üretilen tabakalı derecelendirilmiş FDM’de SEM-EDAX analizi ile elde edilmiş tabakalar ve bileşim yüzdeleri [6].

Devamlı derecelendirilmiş kaplamalarda ise iki önemli özellik vardır. Birincisi; seramiğin kısmi hacmi; ara yüzde %0’ dan yüzde %100’e kadar değiştiğinden, kaplamayla kaplanan arasındaki bağlanma, malzeme uyumluluğu sebebiyle daha iyi olacaktır. İkinci olarak; malzeme özellikleri dağılımlarının düzgün olması sebebiyle FDM kaplı ara katmanda gerilme konsantrasyonları tabakalı homojen kaplamalara göre daha düşük olacaktır [3].

Şekil 7: Oda sıcaklığında bulunan homojen SiC FDM 'inde porosite derecelendirmesiyle diğer özellikler de derecelendirilebilir [2].

Yukarıda bahsedilen tüm derecelendirme çeşitleri genellikle tek boyutta elde edilip kullanılmaktadır. Ayrıca, kısıtlı olmakla birlikte pratikte iki ve üç boyutlu derecelendirmeler de kullanılmaktadır. Fakat iki ve üç boyutlu derecelendirmeler daha çok özel uygulamalar ve laboratuvar çalışmalarında elde edilip kullanılmaktadır. Özellikle üç boyutlu derecelendirme üretimi için kullanılan üretim sistemlerinin diğer sistemlere oranla daha kompleks oluşu da uygulama alanının kısıtlı olmasına yol açmaktadır.

FDM Çalışmalarının Başlaması:

Uzay araçlarında 1500 °C'ye varan sıcaklıklara maruz kalan bölgelerde metal üzerinde çeşitli tekniklerle oluşturulan homojen seramik tabakalar, metali korozyona, oksidasyona ve aşınmaya karşı korusa da sistem yüksek seviyelerde ısıl gerilme sorunuyla karşı karşıya kalmaktadır. Bu sorunun çözümü amacıyla Japonya'da bir üniversitede 1984-1985 yıllarında uzay araçları ve hava taşıtlarının AR-GE çalışmaları sırasında FDM'lerin ilk adımları atılmıştır.

1987 de Japonya Eğitim ve Bilim Bakanlığı desteğiyle büyük bir proje için FDM üzerinde çalışmış araştırmacılar bir araya getirilmiştir. 1987 ve 1991 yılları arasında, üniversitelerden, enstitülerden ve anonim şirketlerden birçok araştırmacı tarafından "Research on the Generic Technology of FGM (Functionally Graded Material) Development for Thermal Stress Relaxation" adı altında bir araştırma projesi yürütülmüştür. Bu proje kapsamında, üretim metotları araştırılmış, malzeme dizaynı, üretimi ve değerlendirmeyi içeren bir işbirliği sistemi kurulmuştur. 1990 yılında Japonya'nın Sendai şehrinde FDM konusunda ilk uluslararası konferans düzenlenmiştir. 1992 yılında FDM'in 10 ileri teknolojidenden biri olarak kabul edilmesiyle FDM teknolojisi küresel seviyeye ulaşmış, önemli bir teknoloji niteliği kazanmıştır [4].

FDM'DEN YARARLANILAN ALANLAR

Uzay taşıtları

FDM'ler ilk bu alan için tasarlanmıştır. İyi ısıl iletkenlik ve iyi ısıl direnç gibi iki zıt özelliğin bir malzemede bulunabilmesi amacıyla FDM'ler geliştirilmiştir. Bu özellikler sayesinde hafiflik, güçlülük ve sağlamlık mümkün olmaktadır. Böylece FDM yapısal malzeme ve enerji değişme malzemesi olarak özellikle roket yapımında ve motorların dış duvarlarında halen uygulanmaktadır [4].

Endüstriyel Malzemeler

FDM'nin endüstriyel malzemelerdeki uygulamalarının geliştirilmesi, araştırmaların ana hedeflerinden biri olmuştur. Örnek olarak derecelendirilmiş kesici kalemlerin geliştirilmesinin nedeni mukavemet ve ısıl direnç bakımından daha iyi malzemelere ihtiyaç duyulmasıdır. Bu alanda umulan aşınma direnci ve sertlik elde edilmiştir. Kendi kendini yağlama fonksiyonu ve yüksek ısıl dirençlerin kesici kalemlerde elde edilmesinin yanında, bazı derecelendirilmiş kalemler sayesinde yağ kullanılmadan uygulanan kuru kesimler de gerçekleştirilmiştir. Bu şekilde geliştirilen bir kalem, iç kısmında çelik yoğunlukta, dış kısmına doğru elmas yoğunlukta. Yüksek hızlı kesici kalemlerde -diğer FDM'lerde olduğu gibi- üretim tekniğinden kaynaklı şekil ve boyutta sınırlamalar bulunmaktadır [4]. Ayrıca yüksek sıcaklık uygulamalarının yanında FDM 'lerin triboloji alanında da kullanımları mevcuttur. Sürtünme veya normal gerilmelerden kaynaklanan yüzey çatlamasını geciktirmek için kullanılan FDM seramikler bu alandaki kullanıma örnek olarak verilebilir [8].

Optoelektronik

İletişim alanında birçok çeşit FDM bulunmaktadır. Görsel iletişimin, sesli iletişimin düzeyine erişebilmesi için daha fazla geliştirilmeye ihtiyacı vardır. FDM'lerin plastik optik fiberlerdeki uygulaması sonucunda zararlı olan çok hızlı iletim önlenmektedir. Sonuç olarak FDM dünyadaki görsel iletişimini çok daha kaliteli hale getirebilecek yapıya sahiptir [4].

FDM ÜRÜNLERİNE ÖRNEKLER

Uzay Sistemleri

Japonya'daki uzay istasyonu Kiba'da test olarak FDM, bir fişek ve geri kullanılabilir bir roket motoru olarak kullanılmıştır. Roketlerin çoğunun kullanıldıktan sonra atılması ve bununla ülkelere pahalıya mal olması, ülkeleri maliyeti azaltmaya yani geri kullanımlı roketler üzerinde çalışmaya yönlendirmiştir. Yapılan çalışmalar gelecekte uzay mekiklerinin geri kullanımlı roketler şeklinde üretilebileceklerini göstermektedir. Şu anda yalnızca, Japonlara ait Obita mekiği geri kullanımlıdır [4].

Güç İletim ve Dağıtım Sistemleri

Bu sistemlerde, FDM teknolojisi devir frenleyici, bağlantı kesici ve yıldırım durdurucu içeren kompleks bir anahtar olan Gaz Yalıtım Anahtarı (GIS-Gas Insulated Switchgear) olarak kullanılmaktadır.

Güç ve Endüstriyel Sistem Araştırma ve Geliştirme Merkezi, Toshiba Carp, kristal yapıya sahip dereceli bir elementten yıldırım durdurucu üretmiştir. Bu elementte dışarıdan içeriye ısıl gerilme kontrolü ve enerji emme kabiliyetinde önemli gelişmeler kaydedilmiştir [4].

İzotop İçerikli Derecelendirilmiş Optik Teller

Japonya'da Asahi Cam Firması, Haziran 2000'den beri izotop içerikli derecelendirilmiş optik telleri kullanmaktadır. Plastik optik teller, esnekliğini kaybetmeyecek şekilde kolaylıkla telin boyutu büyütülebilecek şekilde plastikten imal edilirler. Böylelikle üretim maliyeti önemli ölçüde azaltılabilir. Bu tip malzeme kullanımı ile yüksek hızla bilgi aktarımı mümkündür. Şimdilerde Lucina TM adındaki derecelendirilmiş optik teller ile 10 Gbps'i aşan yüksek hızda bilgi iletimi mümkün olmaktadır. Bu boyut 200000 telefon bağlantısına ve birkaç yüz metre iletim uzaklığına eşittir [4].

JAPONYA'DA FDM ÇALIŞMALARI

Isıl bariyer malzemesi hazırlamak için 1984 yılında Japonya'da FDM düşüncesi ortaya konmuştur. O günden beri, ısıl direnç malzemesi performansını arttırmak için kullanılan derecelendirilmiş fonksiyonel teknoloji geliştirilmeye devam etmektedir. Son yıllarda, Japon hükümeti tarafından desteklenen STA (Agency of Science and Technology) himayesi altında çaba harcanan diğer bir uygulama ise FDM enerji değiştirme veriminin yükseltilmesidir [7].

1987 yılında, FDM'de termal gerilmelerle ilgili bilgileri geliştirmek amacıyla "Research on the Basic Technology for the Development of Functionally Gradient Materials for Relaxation of Thermal-Stress" adı altında STA tarafından desteklenen bir proje başlatılmıştır. Bu projenin hedefi; gelecekteki uzay programları için ısıl-kalkanlı yapısal malzeme geliştirmektir. Çeşitli kuruluşlardan, üniversitelerden, enstitülerden ve firmalardan katılan 17 bilim adamı bu konu üzerinde çalışmaya başlamıştır. Projenin

henüz başlarında SiC/C, PSZ/SUS 304, Ni-esaslı alaşım/ZrO₂, TiB₂/Cu ve TiC/Ni FDM'leri üretilmiştir. Çalışmalar sonucunda FDM'lerin termal şok, yorulma direnci ve termomekanik özellikleri geliştirilmiş, uzay araçları üzerinde yapılan malzeme testleri ise FDM'lerin süper ısı direnç malzemesi olarak kullanılabilceğini ortaya çıkarmıştır [7].

FDM parçalarında çeşitli nedenlerden dolayı boyut kısıtlamaları mevcuttur. 1987-1991 yılları arasında yapılan projenin hedefi; bu kısıtlamaların bir kısmını ortadan kaldırarak daha büyük FDM test parçaları üretmektir. Gerçekleştirilen bu projede FDM araştırmalarındaki tek amaç uzay araçları değil, aynı zamanda optik ve/veya elektronik alanda da yararlı olabilecek FDM'ler üretmektir [7].

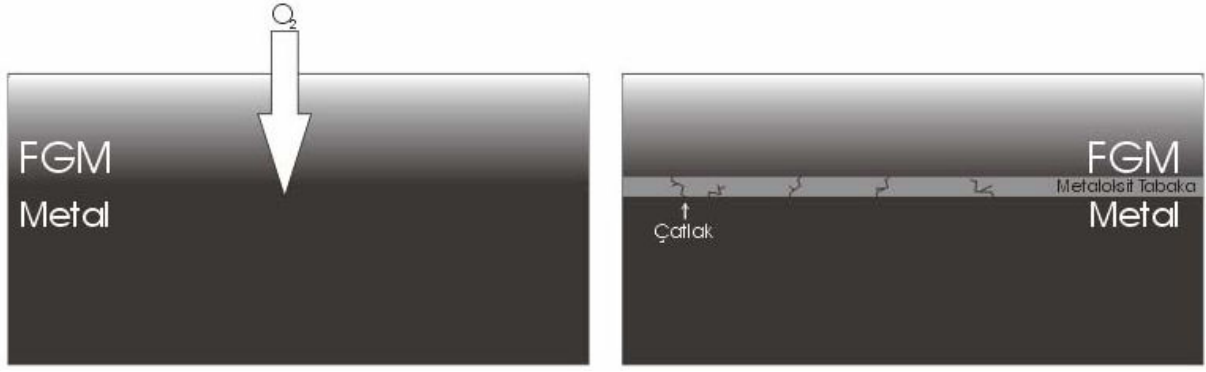
Endüstriyel alanlarda FDM uygulamalarını genişletmek için 1988 yılında bilim adamları tarafından kurulan FDM Forum desteğiyle 1990'da projenin ikinci kısmı başlatılmıştır. Bu araştırma boyunca, sıradan kompozitleri geliştirerek yeni malzeme üretmek amacıyla yaklaşık 200 olasılık kullanılmıştır. Araştırma; enerji değiştiren malzemelerin veriminin FDM teknolojisi yardımıyla geliştirilmesine odaklanmıştır. Yayınlanan sonuçlarda fotoelektrik, termoelektrik, termoyonik ve nükleer enerji değişimleri veriminin FDM kullanımıyla dikkate değer ölçüde arttığı açıklanmıştır [7].

Açıklanan bu araştırma sonuçlarından yola çıkılarak 1993 'te "Derecelendirilmiş Fonksiyonel Yapı ile Enerji Değişimi Malzemeleri üzerinde araştırma" adıyla yeni bir proje özel sermaye ile başlatılmıştır. Bu araştırmada hükümetten, endüstriden ve akademik çevrelerden 30'un üzerinde organizasyon güçlerini birleştirmiştir [7].

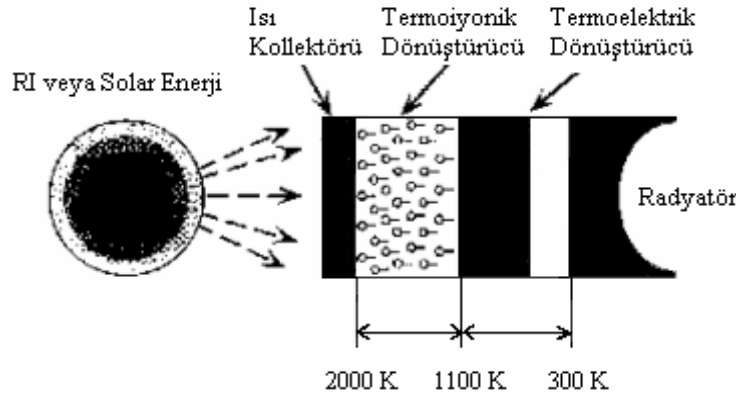
Şekil 8 bu araştırma projesinin enerji değişim formunu göstermektedir. Burada solar ve nükleer enerjiler, beklenen teknolojik gelişmelerin yaygın olarak uygulanabilmesini sağlayacak kaynaklar olarak düşünülmektedir [7]. Şeklin sağ tarafında görüldüğü gibi solar ve radyoaktif enerjiler ısı toplama bölümünde (heat-collection section) ısı enerjisine dönüştürülmektedir. Son olarak, farklı sıcaklık aralıklarında kullanılan farklı değiştiricilerle yüksek verimli melez değiştirici sistemleri (HYDECS) geliştirilmektedir. Bu sıcaklık aralıkları: Termoyonik element 2000K sıcaklığında, termoelektrik elementi 1400K sıcaklığında ve bir ısı radyatör yaklaşık olarak 300K sıcaklığındadır [7].

FDM'LERDE KARŞILAŞILAN SORUNLAR

FDM kaplamaların homojen seramik kaplamalara oranla daha dayanıklı olmasına rağmen yüksek sıcaklığa maruz kalan ortamdaki (örneğin türbinlerin iç kısımları) oksijen, kaplamayı geçip alt tabakaya yaklaştıkça (türbinlerde ısıya dayanıklılığı bakımından alüminyum üzerine FDM kaplama yapılır) alüminyum ile reaksiyona girmektedir. Sonuç olarak Al₂O₃ yani alumina denen çok sert ve gevrek bir tabaka oluşturmaktadır. Bu tabaka özellikle alt tabaka (homojen metal) ile FDM arasında oluşur. Bu tabaka FDM avantajlarını kötü etkilemektedir. Çünkü alt tabaka ile kaplama arasındaki devamlılık ortadan kalkmıştır. Bunun sonucunda oluşan tabakada çatlaklar oluşur ve kaplamanın dökülmesi kaçınılmaz olur (Şekil 7).



Şekil 7: FDMlerde en sık karşılaşılan sorunlardan biri olan alt tabakanın oksitlenmesi



Şekil 8: FDM projesinde Enerji Değişim Formu [7]

Ayrıca birçok üretim tekniğinde oluşturulan kaplamaların kolonlar (columnnar) şeklinde olmasından dolayı kaplamanın isotropikliği bozulur ve kaplama ortotropik olur. Çoğu durumda istenmeyen bu durum uyumsuzluklara yol açmaktadır. Fakat tank zırhlarında olduğu gibi ortotropik FDM'lerin kullanıldığı alanlar da mevcuttur.

FDM'lerde karşılaşılan diğer bir sorun ise üretim tekniklerinden kaynaklanan parça büyüklüğünün kısıtlanmasıdır. Yapılan çalışmalarda üretilen FDM parçaları 200 cm²'den küçük parçalardır. Seçilen üretim tekniğine ve derecelendirme boyut sayısına göre maksimum FDM parça boyutları değişiklikler göstermektedir.

SONUÇ

Çağımızın malzemesi olarak nitelendirilebilecek FDM'ler ile istenilen derecelendirme, dolayısıyla istenilen fiziksel ve/veya kimyasal özellikler elde edilerek pek çok alanda yüksek uygulama verimine ulaşılmıştır. Teoride istenildiği gibi şekillendirilebilen ve mükemmel görünen FDM'lerin deneysel çalışmalarda bazı sorunları beraberinde getirdiği de görülmüştür. Dünyanın hızla gelişen stratejik teknolojilerinden birisi olmasına rağmen yalnızca Japonya ve ABD'de gereken önemi görmesi son yıllarda bu iki ülkenin uzay sanayinde, endüstride ve iletişimde diğer ülkelere oranla hızla gelişmesine yol açmıştır.

Fazla çeşitte üretim tekniğinin olması, hükümetlerin, enstitülerin, üniversitelerin ve özel sermayenin bu konuya verdikleri önemin fazla olması, FDM teknolojisinin hızla ilerlemesini ve ürettiği çözümlerin daha uygun olmasını sağlamaktadır.

Yaşam kalitesini bu denli etkileyen ve stratejik bir malzeme olan FDM'lere ülkemizde yeteri kadar önem verilmemekte, araştırmalar yetersiz kalmaktadır. İletişim teknolojisinde yeni gelişmekte olan ülkemizde FDM'in bu alanda kullanılması potansiyel bir atılım olarak görülebilir.

KAYNAKÇA

1. Kieback, B., Neubrand, A. and Riedel, H., "Processing Technique for Functionally Graded Materials" Materials Science and Engineering, A362 (2003) 81-105, 2003
2. Dröschel, M., Hoffmann, M.J., Oberacker, R., Both, H., Schaller, W., Yang, Y.Y., and Munz, D., "SiC-Ceramics with Tailored Porosity Gradients for Combustion Chambers" New Perspectives, Vol. 175-176; TTP Switzerland; ISBN 0-87849-846-x; pp 149-162, 2000
3. Yıldırım, B. ve Dimitoka, K., "Katmalı ve Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemelerden Yapılmış Termal Bariyer Kaplamalardaki Termal Gerilimlerin Sonlu Elemanlar Metodu ile Hesaplanması", Mühendis ve Makina, Sayı 525, st. 34-42, 2003
4. http://fgmdb.nal.go.jp/e_whatsfgm.html
5. <http://www.hut.fi/u/bzhang/>
6. Shin, K., Natu, H., Dutta, D., Mazumder, J., "A Method for the Design and Fabrication of Heterogeneous Objects", Materials and Design 24 (2003) 339-353
7. Koizumi, M., "FDM Activities in Japan", Composites Part B, PII: S1359-8368(96)00016-9, 1996
8. Suresh, S., Olsson, M., Giannakopoulos, A.E., Padture, N.P. and Jitcharoen, J., 1999, "Engineering the Resistance to Sliding-Contact Damage Through Controlled Gradients in Elastic Properties at Contact Surfaces," Acta Materialia, Vol. 47, pp. 3915-3926