

TÜRBİN KANADI KAPLAMALARINI LAZER İLE DELME VE YÜZEY MODİFİKASYONU

Ekrem ALTUNCU Kocaeli Üniversitesi
Fatih ÜSTEL Sakarya Üniversitesi

ÖZET

Lazer ile delme işlemi yüksek hassasiyette ve tekrarlanabilir kalitede çok küçük kanal ve deliklerin açılmasında yüzeye temas edilmeden uygulanabilmektedir. Bu prosesin avantajı delinmesi çok zor olan özellikle süper alaşımlara ve ısıya dirençli seramik malzemelere uygulanabilmesidir. Özellikle türbin kanatlarında plazma sprey ile üretilen termal bariyer kaplama (TBK) sistemlerinde soğutma kanallarının açılmasında yaygın olarak kullanılan bir tekniktir. Lazer delme işlemi için genellikle darbeli Nd:YAG lazeri kullanılmaktadır. Lazer ile yüzey modifikasyon işlemleri sonucunda APS TBK sistemlerinde üst seramik tabaka yüzeyinin pürüzlülüğünü azaltılmakta, yüzey porozitesi azaltılarak sıcak korozyon direnci ve erozif aşınma direnci geliştirilerek kaplama ömrü artırılmaktadır.

Anahtar kelimeler

Plazma Sprey ile Üretilmiş Termal Bariyer Kaplamalar, Lazer ile Delme, Lazer ile Yüzey Modifikasyonu

ABSTRACT

Laser drilling process is a non-contact process that can be used to form small holes in a wide variety of materials with a high degree of precision and reproducibility. The advantages of being able to drill difficult materials, specifically turbine superalloys and heat resistant ceramics, are exploited in the laser drilling of cooling holes in thermal barrier coated superalloys. Plasma sprayed thermal barrier coatings (TBCs) consist of a partially stabilised zirconia top coat and a NiCrAlY bond coat, deposited on a Ni-superalloy substrate. Laser drilling was performed using a pulsed Nd:YAG laser. Laser surface modification (as laser glazing) has been revealing a high potential for the improvement of plasma-sprayed

TBCs properties by reducing surface roughness, sealing open porosity and generating a controlled segmented crack network. The lifetime of the plasma-sprayed TBCs have been increased in a hot corrosive environment by laser surface modifications.

Keywords

Plasma sprayed thermal barrier coatings; Laser drilling; Laser surface modification

1. GİRİŞ

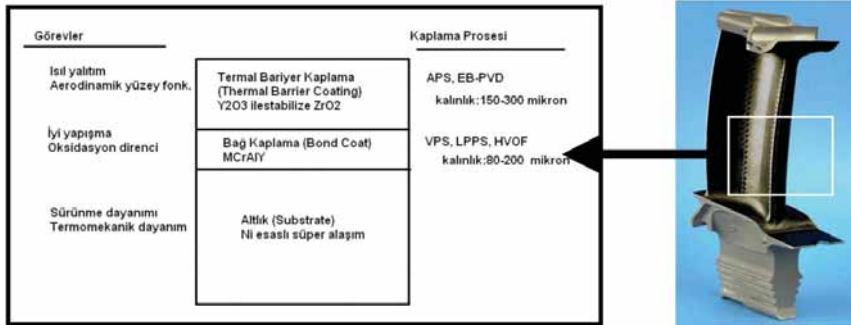
Uzay ve havacılık uygulamalarında gerekli itme gücünü üretmek amacıyla çeşitli tip ve boyutlarda gaz türbin (GT) motorlarından yararlanılmaktadır. Gaz türbin motorlarının termal verimliliğinin gelişmesi gerek ekonomik gerek ise ekolojik anlamda önemli faydalar sağlamaktadır. Türbin motorlarının termal verimliliğinin artırılmasında türbin giriş sıcaklığının yükseltilmesi önemli rol oynamaktadır [1,2]. Sıcaklık artışı beraberinde yüksek sıcaklık koşullarına (oksidasyon, sıcak korozyon, sürünme, termal yorulma, erozif aşınma) dayanıklı malzeme arayışını hızlandırmıştır. Bunun sonucunda da günümüzde uçak gaz türbin kanatlarında yüksek sıcaklık etkilerini engellemek amacıyla termal bariyer kaplama (TBK) sistemleri geliştirilmiştir.

GT motorlarında koruyucu kaplama gelişimine yönelik çalışmalar kapsamında elde olumlu sonuçlar doğrultusunda günümüz uçak gaz türbinlerinde türbin giriş sıcaklıklarını daha yüksek sıcaklıklara (yaklaşık 1600-1700 oC) çıkarmak amacıyla kapsamlı çalışmalar yürütülmektedir. Performans artışının kazanılmasında en önemli unsurlar yüksek sıcaklığa dirençli altlık malzeme, kaplama malzemesi, kaplama metodu tasarımları ile birlikte tasarlanan soğutma teknolojilerinde yaşanan gelişmelerdir [2,3,4,5]. Yüksek sıcaklık koşullarında çalışan GT parçalarının belirli bir kullanım ömrü bulunmakta ve periyodik bakımdan geçmektedirler. Kullanım ömürleri ve periyodik bakım sürecinden önce çeşitli nedenlerle hasara uğrayan parçaların tamir, bakım ve yenileme süreci oldukça yüksek ekonomik maliyetleri ortaya çıkarmaktadır[6]. Modern GT motorların maliyeti, motor başına yıllık 50.000 \$'ı [7] aşan yeni yedek parça masrafları ile milyonlarca doları bulmaktadır. Bu maliyetin büyük bir kısmını türbin sıcak kısmındaki pahalı parçaların değişimi oluşturmaktadır. Ayrıca onarım ve revizyon masrafları tek başına yedek parça maliyetleri hariç, motor başına 100.000 \$'ı [7] aşmaktadır. Görüleceği üzere oldukça yüksek maliyetli ve yüksek güvenilirlik beklentilerine

sahip GT motoru parçalarının tasarımı, montajı, servis sürecinde performansı, bakım, tamir ve yenileme çalışmaları üzerinde durulması gereken önemli konulardır. Bu çalışma kapsamında son yıllarda uygulamaları hızla artan lazer teknolojilerinin gaz türbin parçalarında kullanım alanlarından bahsedilmeye çalışılacaktır. Özellikle türbin kanatlarında, nozüllerde ve yanma odalarında yüksek sıcaklık etkilerine karşı kullanılan termal bariyer kaplama sistemlerinde diot, CO₂, ve Nd:YAG lazerleri ile yüzey modifikasyonlarının (lazer ile sırlama, gravürleme gibi) kullanım ömrü üzerinde etkileri ile türbin kanadı üzerinde uygun konfigürasyonda hassas ve tekrarlanabilir bir şekilde soğutma kanalcıklarının açılmasında lazer ile delme teknolojisinin karakteristik özelliklerinden ve avantajlarından bahsedilecektir.

2. TERMAL BARIYER KAPLAMA (TBK) SİSTEMİ

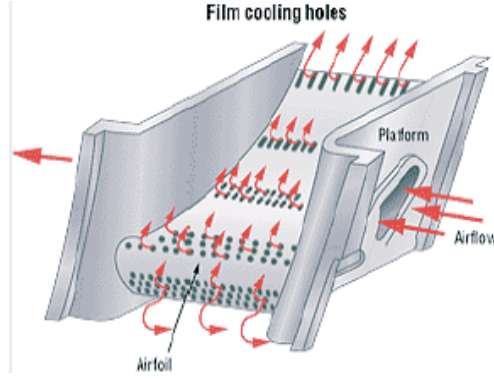
Modern TBK sistemleri yalnızca ısı transferini engellemek yanında oksidasyon, sıcak korozyon ve erozif aşınma problemlerine karşı da koruyucu görev yapmaktadır. Tek katman halinde kaplama sistemlerinin bir çoğu çok katmanlı sistemler gibi çok fonksiyonel özellikler taşımamaktadır. Bu nedenle TBK sistemleri çok katmanlı bir yapıya sahiptir (Şekil 1). Yüksek sıcaklığa dirençli nikel esaslı süper alaşım altlık üzerine bir bağ kaplama tabakası (MCrAlY) kaplanmaktadır. Bu tabaka en üst termal bariyer görevi yapan seramik esaslı kaplama ile altlığın iyi bir şekilde yapışmasına ve altlığın oksidasyon direncine karşı dayanımını artırmak amacıyla kullanılmaktadır. Yüksek porozite ve düşük termal iletkenliğe sahip olan yitria ile stabilize edilmiş zirkonya (YSZ) esaslı seramik TBK malzemesi olarak en popüler kaplama malzemesidir [8]. TBK kaplamaların üretiminde genellikle atmosferik plazma sprej (APS) veya elektron ışını ile fiziksel buhar biriktirme (EB-PVD) prosesinden yararlanılmaktadır [9,10] (Şekil 2). Bağ tabaka ise altlık ile iyi bir yapışma sağlaması amacıyla vakum plazma sprej (VPS), düşük basınçlı plazma sprej (LPPS) veya yüksek hızlı oksit yakıt (HVOF) prosesleri ile kaplanmaktadır [11-14]. EB-PVD ile üretilmiş TBK sistemleri APS ile üretilenlere göre daha üstün özelliklere sahiptir [15-16].



Şekil 1: Şematik olarak termal bariyer kaplama sistemi

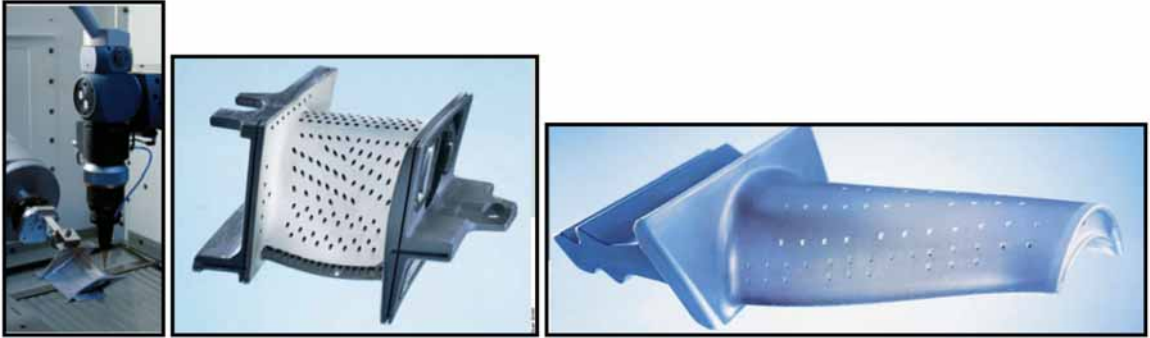
3. TBK SİSTEMLERİNİ LAZER İLE DELME "LASER DRILLING"

Uçak gaz türbin motorlarında termal verimliliğin artırılmasında türbin giriş sıcaklıklarının artırılmasında termal bariyer kaplamalar önemli bir görevi üstlenmelerine karşın yüzey sıcaklığının düşürülmeden sistemin soğutulması da oldukça önem taşımaktadır. Bu amaçla türbin kanatlarında (blade, vane), yanma odalarında ve nozüllerde soğutma kanalcıklarının hassas ve tekrarlanabilir bir şekilde açılması gereksinimi doğrultusunda lazer ile delme tekniğinden yararlanılmaktadır (Şekil 2) [17]. Uçak motorlarında sıcak kesitte çalışan parçalar üzerinde 1000'lerce birbirine yakın deliğin açılmasında kullanılan lazer ile delme işlemi diğer proseslere göre oldukça ekonomik bir prosestir. Lazer ile delme prosesi aracılığıyla soğutma kanallarının açılması işlemi yüzey ile temas edilmeden optik olarak yapılan bir yüzey işleme prosesisidir [17] (Şekil 3) Lazer uygulamaları konusunda çalışmalar yapan Yeo isimli araştırmacı lazer ile delik delme işlemi; yüksek şiddetli bir ışının bir noktaya odaklanarak o noktada buharlaşma sonucu kanal açılması işlemi olarak tanımlamaktadır [18]. Delme işleminin zor olduğu süper alaşımlar ve seramik esaslı malzemelerde lazer ile delme prosesi önemli avantajlar sağlamaktadır [19].



Şekil 2: Türbin vane kesitinde soğutma kanalları ve hava akışı

Lazer ile delme prosesi kapsamında iki tip lazer ile delme methodu mevcuttur. Bunlar: darbeli (pulsed or percussion) veya burgulu (trepan) lazer delme işlemleridir (Şekil 5a,b). Burgulu lazer delme işleminde delik dairesel olarak kesilerek oluşturulmaktadır. Buna karşın darbeli lazer kesme işleminde darbeli olarak iş parçası ve lazerin birbirine göre relatif bir hareketi olmaksızın delme işlemi gerçekleştirilmektedir. Darbeli lazer delme işleminin asıl avantajı 4-10 sn burgulu lazer delme işlem süresini 1 sn'nin altına indirebilmesidir. Uçak motorlarında yaklaşık 100.000 delik açıldığı düşünüldüğünde darbeli lazer delme sistemi üretici için zaman kaybını azaltmakta ve ekonomik anlamda önemli bir kazanç sağlamaktadır[17].Lazer ile delik delme işleminde genellikle darbeli Nd:YAG lazeri (λ : 1,06 μm) odaklanan tek bir noktaya yaklaşık 0,2 MW mm⁻² güç yoğunluğuyla birlikte delik açmaktadır. Delik açma işlemi hem yüzeyin normali ile hem de belirli eğim açılarında yapılabilmektedir[19] (Şekil 3).



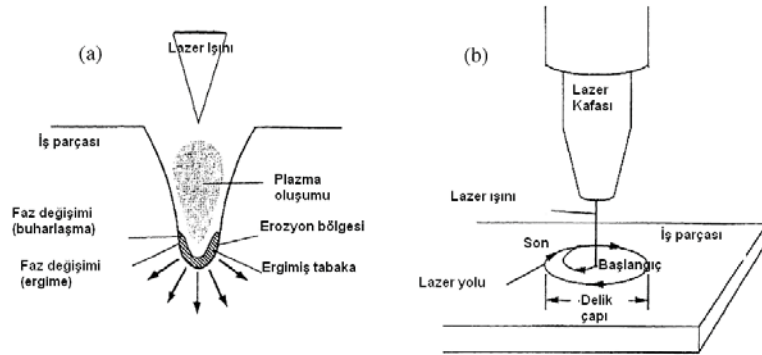
Şekil 3: Türbin kanadı (vane, balde) kesitinde soğutma kanallarının lazer delme işlemi ile delik açılışı ve soğutma kanalcıkları

Uçak motor parçalarında lazer ile delinen deliklerin mutlak suretle belirlenen kalite standartlarına uyması gerekmektedir. Bu nedenle en uygun şekilde darbeli delik delme prosesinin gerçekleştirilebilmesi amacıyla birçok araştırma yapılmaktadır. Bu araştırmalar genel olarak lazer ile delme prosesinde deliğin metalurjik ve geometrik kalitesi üzerinedir. Delme işlemi sonucunda mikro çatlak oluşumu (microcracking), yeniden ergimiş malzeme kalıntıları (remelt materials) ve delinmiş deliklerde koniklik (taper) gibi bazı negatif etkilerin engellenmesine yöneliktir [17]. Birçok parametrik çalışma sonucunda lazer delme prosesi parametreleri ile delik kalite karakteristikleri arasında ilişkiler olduğu ortaya çıkarılmıştır[20-24]. Buna karşın termal bariyer kaplamalar ve süper alaşım malzemelerde delik oluşumunu ve bağ tabaka ile altlık arası tokluk özelliklerini etkileyen faktör ve proses parametreleri üzerinde yoğun araştırmalar sürdürülmektedir. Lazer ile delme işleminde önemli parametreler lazer, malzeme ve proses olmak üzere üç ana başlık altında toplanmaktadır (Şekil 4.).

LAZER İLE DELME İŞLEMİNDE ÖNEMLİ PARAMETRELER

LAZER	MALZEME			PROSES
	OPTİK	TERMOFİZİKSEL	MEKANİK	
lazer türü lazer dalgaboyu çıkış gücü (output power) darbe enerjisi (pulse energy) rep.rate darbe uzunluğu (pulse length) ışın çapı (beam diameter) ışın polarizasyonu (beam polarisation) ışın diverjansı (beam divergence) ışın şiddet profili (beam intensity profile) -spatial -temporal	Absorptivite Reflektivite Refraktif indeks Yüzey pürüzlülüğü	Termal iletkenlik Spesifik ısı Ergime noktası Kaynama noktası Buharlaşma entalpisi Yüzey gerilimi Buhar basıncı	Yoğunluk Sertlik Poisson oranı Elastik modül	Lens NA Spot boyutu Shot overlap Gaz desteği Odak düzlemi Proses hızı Delme tekniği

Şekil 4: Lazer ile delme işleminde önemli parametreler[25].



Şekil 5: Şematik olarak (a) Darbeli (pulsed or percussion) veya (b) Burgulu (trepan) lazer delme işlemleri [17]

Termal sprey tekniği (APS) ile kaplanmış uzay ve havacılık malzemelerinin Nd:YAG JK704 ve Nd:YAG SD/C150 lazerleri kullanılarak darbeli lazer ile delinmesi üzerine yapılan istatistiksel çalışmalar sonucunda deliklerin metalurjik kalitesi ile lazer parametreleri arasında ilişkiler doğrultusunda; yeniden ergimiş tabaka ve kütleli numune içinde mikro çatlak oluşumunun yüksek enerjili darbelerle (high energy pulses) azaltılabildiği gözlenmiştir. Düşük enerjili darbeler sonucunda yapışkan yeniden ergimiş malzeme miktarının azalmasına yardımcı olduğu anlaşılmıştır. Bunun yanında yardımcı gaz olarak oksijenin diğer argon ve sıkıştırılmış havaya göre en uygun yardımcı gaz olduğu ortaya çıkmıştır[17]. Bunun yanı sıra mikro çatlak, delaminasyon ve yeniden ergimiş tabaka kalınlığı gibi metalurjik oluşumların (Şekil 6.) incelenmiş ve alttaki sonuçlar elde edilmiştir:

- 1. Darbe enerjisi:** Yüksek darbe enerjisi mikroçatlak oluşumunu azaltmaktadır. Düşük darbe enerjisi ise lazer ile delinmiş deliklerde yeniden ergimiş malzeme kalıntılarını azaltmaktadır.
- 2. Darbe genişliği:** Kısa darbe genişliği mikroçatlak şiddetini ve delaminasyon oluşumunu önemli seviyede azaltmaktadır.
- 3. Darbe şekli:** Yeniden ergimiş tabaka kalınlığı genel olarak darbe şeklinden etkilenmemektedir. Delaminasyonu azaltmak için ramp-up darbe şekli tercih edilmektedir. Mikro çatlak oluşumunu azaltmak için ise treble darbe şekli daha iyi sonuçlar vermektedir.

- 4. TBK yoğunluğu:** TBK yoğunluğunun mikro çatlak ve yeniden ergimiş malzeme kalınlığı üzerinde etkisi oldukça düşüktür. Yüksek TBK yoğunluğu TBK-bağ kaplama arasında en az delaminasyonu sonucu vermiştir.
- 5. Gaz basıncı:** Yüksek gaz basıncı mikro çatlak, delaminasyon ve kalıntıyı azaltmaktadır.



TBK,
üst kaplama
tabakası

BK,
bağ kaplama
tabakası

Altık

Şekil 4: Tipik bir TBK sistemi lazer ile delme prosesi sonrası mikroyapı ve metalurjik oluşumlar[19]

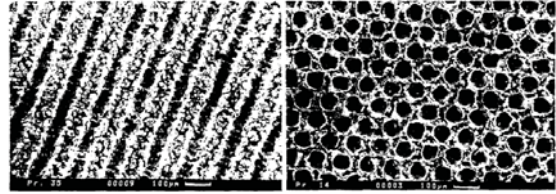
4. TBK SİSTEMLERİNDE LAZER İLE YÜZEY MODİFİKASYONLARI (SIRLAMA, GRAVÜRLEME, YENİDEN ERGİTME)

“LASER GLAZING, LASER ENGRAVING, LASER REMELTING”

4.1. LAZERLE GRAVÜRLEME (LASER ENGRAVING)

TBK sistemlerinin performansı metalik esaslı bağ kaplama ile seramik esaslı TBK arasındaki uyuma bağlıdır. Artan çalışma sıcaklıkları etkisiyle oksidasyon ve termal çevrim koşulları yapışma dayanımının azalmasına dolayısıyla da üst TBK'nın ayrılmasına (delaminasyon) neden olmaktadır [26]. Termal çevrim koşullarında diğer seramiklere göre yitria ile kısmen stabilize edilmiş zirkonya (ZrO_2 +ağırlıkça %6-8 Y_2O_3) üstün termal çevrim direnci göstermektedir[27-28]. MCrAlY alaşımlar ağırlıkça %30-35 Cr ve ağırlıkça %10 Al içermektedir [27, 29]. Kaplamayı termal çevrim dayanımının artırılmasında yüzeye dik şekilde segmentasyon çatlak

ağının oluşturulması, porozitenin % 20'lere çıkarılması, altta metalik bağ kaplamanın yüzeyinin uygun bir şekilde hazırlanması gerekmektedir [30]. Bunun yanında kaplamanın dayanımında önemli unsurlardan bir tanesi de bağ kaplama tabakasının oksidasyon direncidir. Yüksek porozite ve segmentasyon içeren iyonik iletkenliğe sahip zirkonya esaslı TBK yüzeyden oksijenin kolaylıkla geçişine izin vererek metalik esaslı bağ kaplama (BK) tabakasının oksidasyonuna neden olabilmektedir. Bu şekilde BK-TBK arasında bir oksit tabakası meydana gelmektedir [31-32]. Bu oksit tabakası hacimsel genişlemeler nedeniyle iç gerilmeler meydana getirmektedir. Kritik kalınlığa ulaştığında ise delaminasyona yol açmaktadır. BK oksidasyonu termal çevrim direncini de etkilemektedir. Artan oksidasyon atakları termal çevrim sayısının düşmesine neden olmaktadır [33]. Araştırmalarda altlık yüzeyinde yapılan yüzey modifikasyon (konturlama) işlemlerinin (Şekil 7.) iç gerilmeleri dağıtması nedeniyle termal çevrimi direncini artırdığı görülmektedir [26,30,34,35]. Nd:YAG lazer ile bağ kaplama tabakası üzerine yapılan konturlama modifikasyon işlemleri termal çevrim sayısını artırmıştır [26].



a. 60 mikron derinliğinde yiv b. 80 mikron derinliğinde delik

Şekil 7: MCrAlY bağ kaplama tabakası üzerinde Nd:YAG lazer ile yapılan yüzey modifikasyon (konturlama) işlemleri

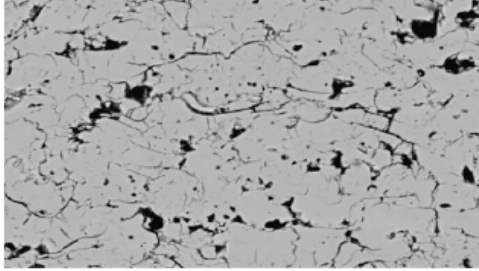
4.2. LAZERLE YENİDEN ERGİTME (LASER REMELTING)

Diot lazer teknolojisi yardımıyla yeniden ergitme ile (Şekil 8) termal bariyer kaplama yapısında belirli değişiklikler yapılarak TBK özelliklerinde değişiklikler gözlenmiştir (Şekil 9)[36]:

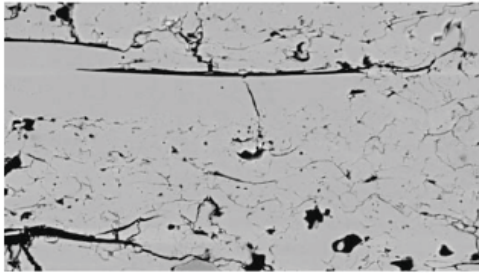
- Lazerle yeniden ergitme ile lamelli yapı dentritik kolonsal yapıya dönüştürülebilmektedir.
- Por yapısı üzerinde değişiklikler ile sinterleme hassasiyeti azaltılabilmektedir. Bu durum TBK yapısının yüksek sıcaklıklarda ısı işlem etkisi altında mekanik ve termal özelliklerini koruması açısından önem taşımaktadır.
- Lazer işlemleri sonucunda termal iletkenlik %30 oranında azaltılarak termal yalıtım özellikleri

geliştirilebilmiştir.

- Geçirgenlik azaltılarak oksidasyon ve korozyon azaltılabilmektedir.
- İzotermal şok direnci artırılabilir.

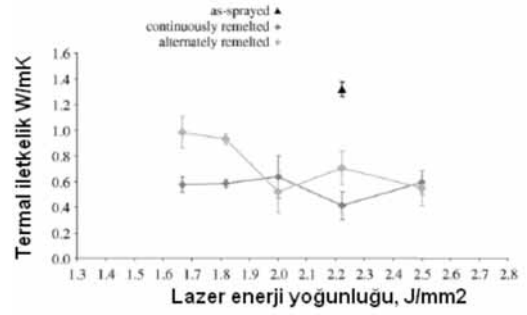
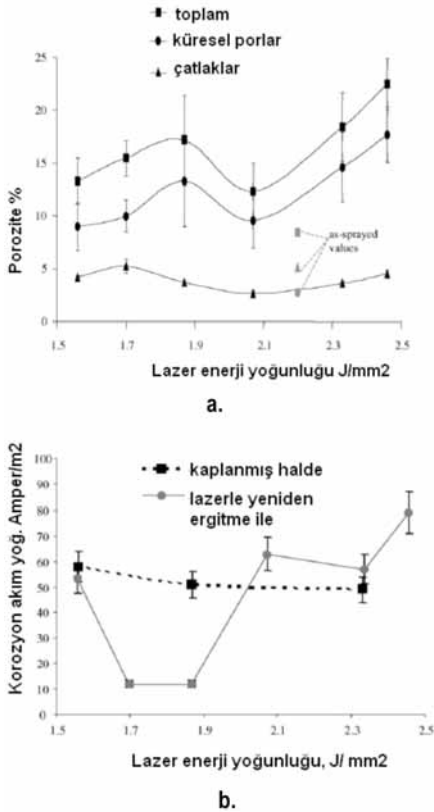


(a)

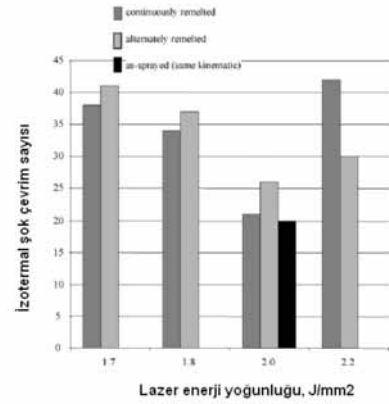


(b)

Şekil 8: APS ile üretilmiş TBK a. Normal kaplama halı b. Lazerle yeniden ertirme mikroyapısı [36]



c.



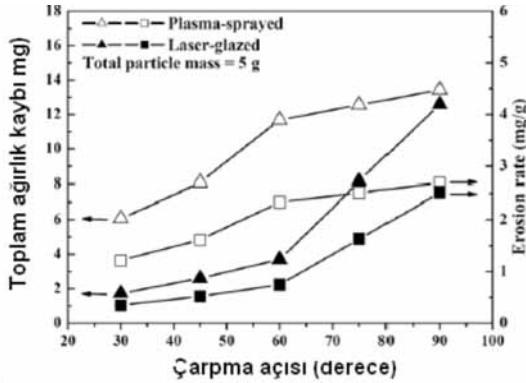
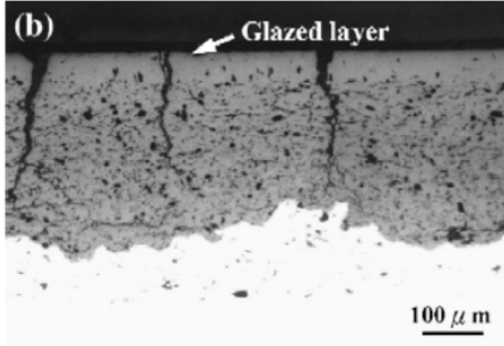
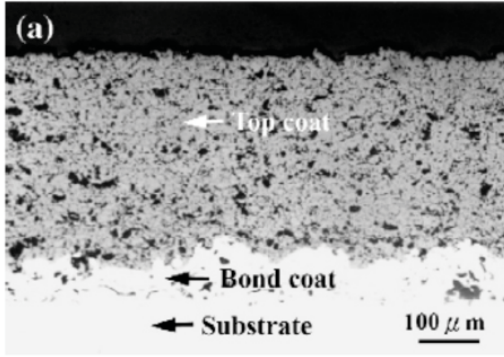
d.

Şekil 9: Lazer ile yeniden ertirme işleminin TBK yapısında değişikliklere etkisi lazer enerji yoğunluğu ile a. Porozite, b. Korozyon akımı, c. Termal iletkenlik, d. Termal şok çevrim sayısı ilişkileri [36]

4.3. LAZERLE SIRALAMA (LASER GLAZING)

Bağ tabakanın oksidasyonu ve termal gerilmelerin etkisi TBK yapısında degradasyona neden olmaktadır. Yüksek ısı akışı ve korozyon ürünlerinin etkisiyle delaminasyon, çatlak, erozif aşınma ve sıcak korozyon sorunlarına karşı lazerle sırlama tekniği olumlu sonuçlar vermektedir[37-43]. Seramik kaplamanın darbeli CO₂ lazeri ile sırlanması APS ile üretilmiş poroziteli kaplama yapısının üzerinde yoğun segmentasyon çatlaklı bir yapının oluşmasına neden olmaktadır (Şekil 10a,b) [46]. Çeşitli araştırmacıların yaptıkları çalışmalar sonucunda lazerle sırlamanın sıcak korozyon termal çevrim sayısını dört kat artırdığını [38,41], termal şok direncini arttırdığını, yüksek ısı akışı altında yüzeyden kaplama dökülmesinin (spallation) engellendiğini tespit etmişler[44,45]. Lazerle sırlama sonucunda kaplama sertliği 550 Hv'den 1550 HV ye yükseltmiştir. Bunun yanında yüzey pürüzlülüğü 9 mikrondan 4 mikrona düşürülmüştür.

Dolayısıyla da erozif aşınma direnci artırılmıştır [46] (Şekil 10c). Yüksek sıcaklıklarda sıcak korozyon ortamını simüle eden çeşitli eriyik tuz (V_2O_5 , Na_2SO_4) ortamında 1000 °C de 100 saat yapılan korozyon testlerinde de Nd:YAG ve CO_2 lazerle sırlanmış yapılarda daha iyi direnç gözlenmiştir [47]. Darbeli CO_2 lazeri ile sırlama sonucunda TBK sistemde farklı Y_2O_3 içeriğine bağlı olarak da sıcak korozyon dayanımına tabi tutulmuş V_2O_5 ortamında artan yitria içeriği ömrünü artırırken, V_2O_5 miktarının artışı ömür üzerinde olumsuz etki yaptığı belirlenmiştir [48].



c.

Şekil 10: APS ile türetilmiş TBK yapısı a. Kaplanmış haliyle b. Lazer ile sırlama sonrası c. Erozif aşınma direnci [46]

5. SONUÇ

Gaz türbin motorlarında sıcak kesit parçaları (türbin kanatları "vane, blades", yanma odaları ve nozüllerde soğutma kanalcıklarının hassas ve tekrarlanabilir şekilde açılması oldukça önemlidir. Bunun yanında yüksek ısı akışını engellemek amacıyla kullanılan termal bariyer kaplama sistemlerinin yüksek sıcaklık koşulları altında termal çevrim, termal şok, erozif aşınma ve sıcak korozyon gibi şiddetli ortam şartlarında kullanım ömürlerinin geliştirilmesinde çeşitli yüzey modifikasyon işlemlerinden faydalanılmaktadır. Bu doğrultuda lazer delme, lazerle sırlama, yeniden ergitme ve gravürleme gibi yüzey modifikasyon işlemlerinin olumlu sonuçlar verdiği görülmektedir. Lazer teknolojisinin diğer malzeme işleme proseslerine göre hızlı ve hassas bir proses olması ekonomik açıdan önemli avantajlar sergilemektedir. Türbin parçalarının lazerle işlenmesinde kullanılan lazerler Diot, CO_2 , Nd:YAG türü lazerlerdir. Lazer ile işleme proseslerinde önemli parametreler lazer, malzeme ve proses olmak üzere üç ana grupta toplanmaktadır. Bu konuda yapılacak çalışmalar ile lazer proses parametreleri ile metalurjik ilişkilerin belirlenmesi hassas ve tekrarlanabilir kanal ve delik üretimi için oldukça önemlidir.

REFERANSLAR

1. D.S. Rickerby and H.C. Low, in Proc. 4th European Propulsion Forum (Royal Aeronautical Society, London, 1993) paper No. 12.
2. Coatings for High Temperature Structural Materials, National Materials Advisory Board Report (National Academy Press, Washington, DC, 1996).
3. G. Lehnert and H. Meinhardt, Surf. Treat. 1 (1972) p. 72.
4. D. Driver, D.W. Hall, and G.W. Meetham, in The Development of the Gas Turbine Engine (Applied Science Publishers, London, 1981).
5. J.R. Nicholls, Advances in Coating Design for High-Performance Gas Turbines, MRS BULLETIN/ September 2003.
6. Dalkılıç s., Tanatmış A. A., Gaz Türbinli Motorların İmalatı Ve Onarımında Kullanılan Gelişmiş İşleme Yöntemleri, Havacılık Ve Uzay Teknolojileri Dergisi Temmuz 2003 CİLT 1 SAYI 2 (49-61).

7. Patnaick, P.C. ve Thamburaj R., Development of a Qualification Methodology for Advanced Gas Turbine Engine Repairs/Reworks, NATO RTO Meeting Proceedings 17, Canada Communication Group Inc., Quebec, Canada, 11 p. (1999).
8. R.A. Miller, Thermal Barrier Coatings for Aircraft Engines: History and Directions, Journal of Thermal Spray Technology Volume 6(1) March 1997—35.
9. Beele, W., Marijnissen, A. and Van Lieshout, A. . The Evolution of Thermal Barrier Coatings -status and upcoming solutions for todays key issues. Surface and Coatings Technology 120-121 (1999) p.61-67.
10. A.G. Evans, D.R. Mumm, J.W. Hutchinson, G.H. Meier, F.S. Pettit, Prog. Mater. Sci. 46 (2001) 505.
11. Y. Itoh, M. Saitoh, M. Tamura, J. Eng. Gas Turbine Power 122 (2000) 43.
12. P. Vuoristo, S. Ahmaniemi, S. Tuurna, T. Mantyla, E. Cordano, F. Fignino, G.C. Gualco, Proceedings of ITSC 2002 - International Thermal Spray Conference and Exposition, Essen, Germany, vol. 1, ASM-International/ DVS, Dusseldorf, Germany, 2002, p. 470.
13. V.V. Sobolev, J.M. Guilemany, J. Nutting, High Velocity Oxy-fuel Spraying: Theory, Structure–Property Relationships and Applications, Maney Publishing, London, 2004, 397 pp.
14. C.R.C. Lima, J.M. Guilemany, Adhesion improvements of Thermal Barrier Coatings with HVOF thermally sprayed bond coats, Surface & Coatings Technology 201 (2007) 4694–4701
15. Y. Itoh, M. Saitoh, M. Tamura, J. Eng. Gas Turbine Power 122 (2000).
16. Y.N.Wu, G. Zhang, Z.C. Feng, B.C. Zhang, Y. Liang, F.J. Liu, Surf. Coat. Technol. 138 (2001) 56.
17. Corcoran A., Sexton L., Seaman B., Ryan P., Byrene G., 2002, The laser drilling of multi-layer aerospace material systems, J. of Mat. Proc. Tech. 123, p. 100- 106.
18. Yeo C.Y., 1994, The physics of laser processing, J. of Mat. Proc. Tech-4, .p.15-49.
19. Voisey K.T., Clyne T.W., 2004, Laser drilling of cooling holes through plasma sprayed thermal barrier coatings, Surface and Coatings Technology 176, p. 296–306.
20. French P.W., Hand D.P., Peters C., Shannon G.J., Byrd P., Sten W.M., Investigation Nd:YAG laser percussion drilling preocess using high speed filming, Sect B, ICALEO98
21. Kamulu J., Byrd P., Statistical design of laser drilling experiments, Sect B, ICALEO98.
22. Yılbaş B.S.,1997, Parametric study to improve laser hole drilling process, J. Matter. Process. Tech.-70, p.264-273.
23. Tam S.C., Yeo C.Y., Jana S., Lau M.W.S., Lim L.E.N., Yang L.J., Noor Y.Md., 1993, Optimisation of laser deep hole drilling of Inconel 718 using the taguchi method, J. Matter. Process. Tech-37, p.714-757.
24. Corcoran A., Sexton L., Seaman B., Byrne G., Laser drilling of multi layer systems in jet engine components, Proceedings of the 16th Internation Conf. on CAPE 2000.
25. D. Karnakis, Oxford Lasers Ltd., "Laser Microdrilling in Industrial Applications"
26. Schmitt Thomas Kh. G., Haindl H., Fu D.,1997, Modifications of thermal barrier coatings (TBCs) Surface and Coating Tech. 94-95, p. 149-154.
27. Stecura S., 1986, Advanced Ceramic Materials- I, p. 68-78.
28. Suhr D.S., Mitchell T.E., Keller R.J., 1984, Advanced Ceramic Materials-12,p. 503-517.
29. Herman H., Shankar N.R., 1987, Material Science and Engineering 88, p. 69-74.
30. Bordeaux F., Saint Jacques R.G., Moreau C., Dallaire S., Lu J., 1992, Surface and Coat. Tech. 53, p. 49-56.
31. Alperine S., Lelait L., 1994, Trans ASME-116,p. 258-265.
32. Lelait L., Alperine S., Mevrel R, 1992. Kournal of Materials Science, 27, p.5-12.

33. Miller R.A., Lowell C.E., 1982, Thin solid Films 95, p. 265-273.
34. Bordeaux F., Saint Jacques R.G., Moreau C., Dallaire S., Lu J., 1991, Surface and Coating Tech. 49, p. 50-56.
35. Strangman T.E., Trans ASME-114, p. 264-267.
36. Antou G, Montavon G, Hlawka F , Cornet A, Coddet C, Machi F, Modification of thermal barrier coating architecture by in situ laser remelting, Journal of the European Ceramic Society 26 (2006) 3583–3597
37. S.O. Chwa, A. Ohmori, Thin Solid Films 415 (2002) 160
38. I. Zaplatynsky, Thin Solid Films 95 (1982) 275
39. N. Iwamoto, N. Vmesaki, H. Katayama, H. Kuroki, Surf. Coat. Technol. 34 (1988) 59.
40. S.Ahmaniemi, P.Vuoristo, T.Mäntylä,C.Gualco,A. Bonadei, R.DiMaggio, Surf. Coat. Technol. 190 (2005) 378
41. A. Petitbon, L. Boquet, D. Delsart, Surf. Coat. Technol. 49 (1991) 57
42. K.M. Jasim, R.D. Rawlings, D.R.F. West, Surf. Coat. Technol. 53 (1992) 75.
43. K.C. Chang, W.J. Wei, C. Chen, Surf. Coat. Technol. 102 (1998) 197.
44. H.L. Tsai, P.C. Tsai, David C. Tu, Mater. Sci. Eng., A Struct. Mater.: Prop. Microstruct. Process. 161 (1993) 145.
45. R.A. Miller, C.C. Berndt, Thin Solid Films 119 (1984) 195.
46. Tsai P-C , Lee J.-H., Chang C-L Improving the erosion resistance of plasma-sprayed zirconia thermal barrier coatings by laser glazing Surface & Coatings Technology 202 (2007) 719–724
47. Batista C., Portinha A., Ribeiro R.M., Teixeira V., Oliveira C.R Evaluation of laser-glazed plasma-sprayed thermal barrier coatings under high temperature exposure to molten salts . Surface & Coatings Technology 200 (2006) 6783–6791
48. Tsai P.C., Lee J.H., Hsu C.S. Hot corrosion behavior of laser-glazed plasma-sprayed yttria-stabilized zirconia thermal barrier coatings in the presence of V2O5, Surface & Coatings Technology 201 (2007) 5143–5147