┫技術論文 ┣━

電子ビーム物理蒸着法ZrO₂系熱遮蔽コーティングの熱生成酸化 物層の成長挙動に及ぼす板厚方向の温度分布の影響

Effect of Temperature Gradient in Through-the-thick Direction on the Growth Behavior of Thermally Grown Oxide Layer in EB-PVD Thermal Barrier Coatings

> 田中誠^{*1} TANAKA Makoto

香川豊*2 KAGAWA Yutaka

ABSTRACT

Thermal fatigue test has been applied to clamped Y_2O_3 -ZrO₂ EB-PVD thermal barrier coating (TBC) flat specimen. The effects of temperature gradient in through-the-thick direction of the specimen on growth morphology of thermally grown oxide (TGO) layer have been studied. It is found that the TGO morphology strongly depends both on temperature gradient condition and surface temperature of the coating layer, respectively. In particular, large temperature gradient (ΔT =180°C) and low temperature lead to significant rumpling behavior of the TGO layer observed in this study. This result suggests that growth morphology of TGO layer should be considered the effects of temperature gradient through-the-thickness direction and temperature, because the TGO rumpling induces the stress through-the-thickness direction leading to failure of TBC.

Key words : Thermal barrier coatings, Thermal fatigue, Temperature gradient, Thermally grown oxide (TGO), Morphology of TGO layer

1. 緒言

熱 遮 蔽 コー ティ ング(TBCs : Thermal Barrier Coatings, 以下TBCsと記す) は発電用・航空機エンジ ン用ガスタービンの静止部品及び動翼などの高温部分 に適用されており, 耐熱金属基材を高温過酷な環境か ら保護する役割を持っている⁽¹⁾⁻⁽³⁾。TBCを施工した部材 では、使用時にZrO₂系のTBC層とAl元素を含むPtAlや CoNiCrAlYなどのボンドコート層の間にAl₂O₃を主成分 とする酸化物を生成する^{(4),(5)}。この酸化物の熱膨張係数 はZrO2及びボンドコート, 基材よりも小さく冷却時に 大きな圧縮残留応力が発生することが知られている。こ の残留応力により、Al₂O₃系のTGO(Thermally Grown Oxide) 層が面外の変形を生じ、TBC層の基材からの剥 離を生じさせる大きな要因になることが明らかになっ ている^{(4),(5)}。このために、熱と力学負荷を組み合わせた 種々の環境下でのTGOの生成現象を知ることは重要で ある。

		原稿受付 2016年10月19日	
		査読完了 2017年8月9日	
*	1	(一財)ファインセラミックスセンター	
		〒456-8587 名古屋市熱田区六野 2-4-1	
*	2	東京大学大学院工学系研究科	
		〒112,0506 支吉区大畑7 2 1	

〒113-8586 文京区本郷 7 - 3 - 1 E-mail: m_tanaka@jfcc.or.jp これまでの研究から,TGO層の生成厚さは力学負荷 の影響は少ないが,熱履歴に大きく依存することが知ら れている^{(6).(7)}。実際のTBCsの使用環境下では,表面は 高温になるが,基材は冷却されているためにコーティン グ層中では,TBC層内に温度勾配を持つことになるの で熱履歴の影響には温度勾配の影響を考えなければなら ない。これまでに,TBCsの恒温熱曝露試験や熱サイク ル試験などが数多く行われ,TGOの生成機構に関して も調べられてきた⁽⁴⁾⁻⁽⁷⁾。しかし,実環境で発生する温度 勾配が付与されている条件下でのTGO層の成長挙動に 関しては限られた範囲のデータしか得られていない。そ こで,本研究ではTBC層に温度勾配が生じる条件下で 熱疲労試験を行い,種々の温度及び温度勾配条件下にお けるTGO層の成長挙動を調べることを目的とした。

2. 実験方法

2.1 装置の構成

熱サイクル試験に用いた装置はすでに報告したものと 同じである⁽⁸⁾。試験片の加熱及び冷却システムの概略図 を図1に示す。高周波発振器(出力10 kW,周波数80± 30kHz)により試験片のTBC層側に配置されたコイルに 電流を流し,Al₂O₃ホルダー内のMoSi₂製サセプターを 加熱し,Al₂O₃ホルダー表面からの輻射熱によりTBC層



Fig. 1 Schematic drawing of the specimen heating and cooling system.

表面を加熱した。このとき,試験片表面が加熱される部 分は直径~20mmの円形であり,TBC層表面とサセプ ターとの距離は~4mmである。冷却時は,加熱源であ るサセプターを冷却するとともに,試験片の基材側に設 置したピンホールを設けたエアノズルを用いて圧縮空気 を基材に吹き付けた。なお,加熱時には圧縮空気の供給 は停止した。

TBC層表面温度は、ファイバ式放射温度計(IR-FAI, (㈱チノー)によりサセプター中央部の円筒状穴を介し て測定した。TBC層表面での温度測定領域直径は~3.4 mmである。この際、サセプターからの熱も放射温度計 は測定しているため実際の試験片表面の温度と誤差が生 じる。この誤差の補正方法を付録Aに示す。

2.2 温度勾配下での熱サイクル試験

厚さ~ 200 μ mのTBC層を厚さ~ 200 μ mボンドコー ト層(BC層)の上に電子ビーム物理蒸着法(以後, EB-PVDと記す)によりコーティングした試験片を用いた。 TBC層は8 mass%Y₂O₃-ZrO₂であり,BC層は減圧プラ ズマ溶射法にてコーティングした化学組成が(mass%) 32.0-Ni, 21.0-Cr, 8.0-Al, 0.5-Y, 残りはCoのものである。基 材には厚さ≈3 mmのInconel 738LCを用いた。基材の 化学組成(mass%)は16.0-Cr, 8.5-Co, 3.4-Al, 3.4-Ti, 1.7-Mo, 2.6-W, 1.75-Ta, 0.9-Nb, 0.11-C,残りはNiである。以 後,基材にBC層及びTBC層がコーティングされたもの を「TBCシステム」と記述する。試験前のTBC層とBC 層間に生成していたTGO層の厚さは $h_{tgo}\approx0.7 \mu$ mである。 なお、実験に用いたTBCシステムは、すでに種々の特 性を報告したものと同じである⁽⁹⁻⁽¹¹⁾。

TBCシステム試験片の形状及び寸法を図2に示す。 熱負荷のみを加えるために,TBCシステム試験片は上 側掴み部のみを試験機に固定し,もう一方の端部は自由 に変形できる状態にした。加熱速度は5℃/s,冷却速度 は20℃/sとした。 熱サイクル中のTBC層表面の最低温 度は T_{min} =300℃,最高温度は T_h =1150℃で1h保持とした。 最大繰り返し数はN=250回とした。

加熱時に,試験片には長手方向に温度分布が発生する。そのため,熱サイクル試験前にあらかじめTBCシ



Fig. 2 Shape and dimensions of the specimen.

ステム試験片の長手方向の温度分布を測定した。図2に 示した加熱領域中央部のA点と試験片長手方向にA点か ら5mm及び10mm離れた位置(B及びC点)のTBC層表 面と基材裏面にR熱電対を取り付けA点のTBC層表面を 1150℃まで加熱して保持した。その時のそれぞれの温度 を読み取り,A,B及びC点でのコーティング層厚さ方 向の温度勾配を確認した。熱サイクル試験後に試験片の 厚さ方向の断面を切断研磨し,A,B及びC点の断面組 織観察を走査型電子顕微鏡(SEM)にて行った。また, TGO層の厚さはSEMにて観察した写真を用いて測定し た。

3. 実験結果及び考察

3.1 試験片の温度分布及び温度勾配

1サイクル中の試験片中A点のTBC層表面と基材裏面 の温度履歴を図3(a)に示す。温度の上昇とともに温度勾 配も徐々に増加し, 最高温度ではほぼ一定の温度勾配を 示した。最高温度でTBC層表面温度は*T_{tbc}*=1150±2℃ の範囲内で保持された。一方、冷却時では圧縮空気が試 験片に吹き付けた際に急激に一旦冷却された。熱サイク ル中の最高保持温度(TBC層表面温度 T_{tbc} =1150°C)で のA, B及びC点のTBC層表面温度T_{tbc}, 基材裏面温度T_s 及びその温度勾配 $\Delta T(=T_{tbc}-T_s)$ を図 3(b)に示す。熱 サイクル中の最高保持温度では、試験片A点のTBC層表 面温度は*T_{tbc}*=1150℃(制御温度)であり、その基材裏 面温度はT_s=1020℃でΔT=130℃の温度勾配が発生し ていた。B点ではTBC層表面温度は T_{tbc} =1115℃であり、 基材裏面温度は T_s =985℃で ΔT =130℃であった。また, C点ではTBC層表面温度は*T_{tbc}*=1065℃であり、基材裏 面温度はT_s=885℃でΔT=180℃であった。これらの温 度データとTBC層, BC層, 及び基材の熱伝導率を用い た定常熱伝導計算により、おおよそのTBC/BC層界面の



Fig. 3 (a) TBC surface and substrate backsurface temperature at position A during thermal cycling. (b) Temperature gradient at position A, B and C indicated in Fig. 2.

温度*T*_iは次式で求まる。

$$T_{i} = \frac{T_{ibc} \left(\lambda_{ibc} \lambda_{bc} h_{s} + \lambda_{ibc} \lambda_{s} h_{bc} \right) + T_{s} \lambda_{bc} \lambda_{s} h_{ibc}}{\lambda_{ibc} \lambda_{bc} h_{s} + \lambda_{ibc} \lambda_{s} h_{bc} + \lambda_{bc} \lambda_{s} h_{ibc}}$$
(1)

ここで、 λ は各層及び基材の熱伝導率、hは各層及び基 材の厚さである。各層及び基材の熱伝導率¹²を用いて計 算すると、試験片A点のTBC/BC層界面の温度は T_i = 1090℃,B点では T_i =1050℃,C点では T_i =980℃である。 これより、加熱領域中央部A点から長手方向に離れるに 従い試験片の温度は低下するが、コーティング層厚さ方 向の温度勾配は増加していることが明らかになった。こ のことより、温度分布と同様に試験片長手方向に温度勾 配分布が存在し、一度の試験で異なった温度勾配下の TGO層の生成現象が観察できるものと考えられる。

3.2 TGO層の成長挙動

図4に熱サイクル試験後のA及びC点の断面組織写真 を示す。A及びC点ともにTBC層とBC層の間に試験前に 比較してTGO層が成長する現象が観察された。生成し たTGO層の厚さはC点よりもA点の方がおよそ2倍厚い ことがわかる。また、C点ではTGO層の厚さのばらつき が大きく、その形態のランプリング (Rumpling) と呼 ばれるうねりが顕著に観察される。また、C点ではBC 層に「D」で示した濃灰色の相が観察された(図4(b), (d))。本研究とほぼ同様な組成のBC層を調べた報告^{(13,(4)} によると、濃灰色領域はβ相あるいはγ'相、その他の 薄灰色領域はγ相であり、それぞれはAlに富む相及び Al欠乏相であることが報告されている。また, TGO/ BC層界面から数 μ m以内のBC層内において濃灰色の β 相はA点では観察されなかった。従って、A点ではBC 層内のAlがTBC層側に拡散しβ相が消滅してγ相のみ となっており、C点ではAl濃度が高いβ相が残っている。 このことから、TGO層を形成するために消費されたBC



Fig. 4 SEM images of the TGO morphology after thermal cycling, (a) N=50 times, position A, (b) N=50 times, position C, (c) N=250 times, position A and (d) N=250 times, position C.

層内のAlはA点よりもC点の方が少なかったと考えるこ とができる。

TGO層の厚さを定量的に求めるために、平均TGO層 厚さ \bar{h}_{tgo} を

$$\overline{h}_{igo} = \frac{\sum_{i=1}^{N_m} h_{igo}^i}{N_m}$$
(2)

で定義した。ここで、 h_{igo} は測定したTGO層厚さ、 N_m は 測定値の数を示している。 h_{igo} は研磨された断面SEM写 真(倍率×3000)において3 μ m間隔で界面に対して垂 直に50箇所測定した。図5にA、B及びC点における平 均TGO層厚さ \bar{h}_{igo} と熱サイクル数Nの関係を示す。図中 のエラーバーは、測定したTGO厚さの最大及び最小値 を意味する。熱サイクル数の増加に伴い、TGO層厚さ が増加している。一般的に、TGO層の平均厚さ(\bar{h}_{igo}) と熱曝露時間(t)の関係は

 $\overline{h}_{tgo} \approx k_p t^n \tag{3}$

で表されることが知られている。ここで, k,は速度定 数,tは熱曝露時間(熱サイクルの場合,最高温度での 保持時間)を表す。速度定数なは熱曝露温度や曝露条件 によって異なるが、熱サイクル負荷と力学負荷が同時に 加わる熱機械疲労試験においては負荷荷重に依存しない ことが報告されている¹⁵。しかしながら、温度一定の静 的クリープ試験では負荷荷重に依存することが報告され ている¹⁶。さらに、本研究で用いたTBCシステムと同じ 材料系でのTGO層生成時のnの値は0.33程度であること が報告されている¹⁷⁷。本実験で得られたデータを最小二 乗法によりnを求めたところ、A点ではn=0.29、B点では n=0.26, C点ではn=0.14であった。C点のnの値がA及び B点に比較して小さいのは、TBC層内の大きな温度勾配 により内方向への酸素の拡散速度がTBC層内で大きな 分布を持つことに関係していると推察される。これより, TBCシステムにおいてTGO層は温度及び温度勾配条件 によって異なった成長挙動を示すことが本実験の結果よ り明らかとなった。



Fig. 5 Plots of TGO layer thickness vs. number of cycles at position A, B and C.

TBCシステム断面から観察したTGO層のランプリ ングを定量的に評価するために、A、B及びC点で生成 したTGO層のランプリングの振幅及び屈曲度を求めた。 TGO層厚さ測定に用いた写真において、TBC/TGO層 界面のランプリング形状をデジタイザーを用いて、面内 方向をx、膜厚方向をyとして二次元座標化した。このと きの座標間間隔は0.08µmで、データ数は500点である。 座標化したTBC/TGO層界面形状データから次式により 定義したランプリング形状の振幅∂を求めた。

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} y_i^2} \tag{4}$$

ここで, nは測定したデータ数, y_iは膜厚方向座標の平 均値とそれぞれの測定値との差である。また, ランプリ ングの屈曲度Ωは, 界面に沿った方向の測定範囲及びラ ンプリングの生じた界面の長さをそれぞれL₀及びLとし, Ω=L/L₀で定義した。ランプリングの生じた界面の長さ Lは, 次式により算出した。

$$L = \int_{-\infty}^{\infty} \sqrt{1 + (f'(x))^2} dx$$
 (5)

ここで, *f*(*x*) はデジタイザーにより座標化したデータから求めたものである。

図6に熱サイクル回数とTGO層のランプリングの振幅及び屈曲度の関係を示す。熱サイクル回数N=50回で



Fig. 6 (a) Amplitude of TGO undulation as a function of number of cycles. (b) Tortuosity of TGO layer as a function of number of cycles.

は、すべての場所において~0.6µm程度の振幅を示し た。その後、熱サイクル回数の増加によりA及びB点に おいては振幅が僅かに減少する傾向を示したが、C点 においては逆に振幅が増加する傾向を示した。これよ り、TBCシステムが曝される温度が本実験条件内(T_{the} =1065~1150℃)においては、低温度且つ大きい温度 勾配条件であると熱サイクル回数の増加に伴いTGO層 のランプリングの振幅が増加することが明らかになっ た。本実験により生成したTGO層の屈曲度はΩ=1.04-1.08であった。N=50回では、A点においてΩ=1.04を示 し、B及びC点へとTBC表面温度の低下に伴いTGO層の 屈曲度は増加した。その後、N=250回においてA及びB 点ではΩ~1.06に収束したが、C点においては熱サイク ル数の増加に伴い屈曲度が僅かに増加した。N=50回に おいて、ランプリングの振幅は全ての温度条件でほぼ同 じであるが、屈曲度は大きく異なる。ここで、TGO層 のランプリング形状を正弦波であると仮定すると、その 波長Wは以下の式で表せる。

$$W \approx \frac{\pi \cdot \sqrt{2} \cdot \delta}{\sqrt{L/L_0 - 1}} \tag{6}$$

式(6)を用いて求めたランプリング波長は、N=50回にお けるA, B及びC点でそれぞれW=12.3, 10.5及び9.5µmで あり、温度及び温度勾配条件によりランプリングの波 長が異なることが明らかになった。また、N=250回で は、A及びB点の振幅と屈曲度はほぼ同じであるが、C 点では大きく異なる。したがって、温度勾配が大きい場 合, TGO層のランプリングが顕著であることが示唆さ れた。なお、TGO/BC層界面形状についてもTGO層の 振幅及び屈曲度を測定したところ同様な結果が得られた。 TBC層は熱曝露に伴い焼結が進行し、弾性率が増大す ることが知られている¹⁸。本実験のようにTBC層内に温 度勾配が存在する場合, TBC層の表層側とBC層側では 弾性率の増大率が異なることが予想され、TGO層近傍 において熱サイクル時にかかる局所的な熱応力は、温度 勾配が存在しない場合と異なることが考えられる。これ より、TBCシステム内の温度勾配が大きい場合、TGO 層のランプリングが顕著になったと考えられる。

上述したように、低温度且つ大きい温度勾配条件であ ると熱サイクル回数の増加に伴いTGO層のランプリン グの振幅が増加する。しかしながら、ランプリング挙動 に及ぼす支配的因子が温度であるか温度勾配であるかは、 完全には明確になっていない。今後、定常熱伝導計算に より推定したTBC/BC層界面の温度を最高保持温度とし て、板厚方向に温度勾配を付与しない熱サイクル試験を 実施し、TGO層のランプリング挙動を検証する予定で ある。

4. 結論

EB-PVD法により作製されたTBC試験片を用いて TBC層と基材間に温度勾配が生じる条件下での熱サイ クル試験を行った。その結果、コーティング層の厚さ 方向に温度勾配を付与した場合、温度及び温度勾配の 条件によってTGO層の成長挙動が大きく異なることが 明らかになった。特に、温度勾配が大きい場合(ΔT = 180°C)、TGO層のランプリングが顕著となり、TGO層 内に膜厚方向の応力が発生するため、TGO層の応力や 組織変化などからTBCシステムの使用限界を議論する 場合は注意が必要である。

参考文献

- Padture N.P, Gell M, Jordan E.H., Science, 296 (2002), p. 280.
- (2) Nicholls J.R., MRS Bulletin, 28 (2003), p. 659.
- (3) Peters M., Leyens C., Schulz U., Kaysser W.A., Adv. Eng. Mater., 3 (2001), p. 193.
- (4) He M.Y., Evans A.G., Hutchinson J.W., Acta Mater., 48 (2000), p. 2593.
- (5) Mumm D.R., Evans A.G., Spitsberg I.T., Acta Mater., 49 (2001), p. 2329.
- (6) Shillington E.A.G., Clarke D.R., Acta Mater., 47 (1999), p. 1297.
- (7) Sohn Y.H., Kim J.H., Jordan E.H., Gell M., Surf. Coat. Tech., 146-147 (2001), p. 70.
- (8) 田中 誠, 香川 豊, 日本ガスタービン学会誌, 37 (2009), p. 168.
- (9) Tanaka M., Liu Y.F., Kim S.S., Kagawa Y., J. Mater. Res., 23 (2008), p. 2382.
- (10) Tanaka M., Kitazawa R., Tomimatsu T., Liu Y.F., Kagawa Y., Surf. Coat. Technol., 204 (2009), p. 657.
- (11) Tanaka M., Mercer C., Kagawa Y., Evans A.G., J. Am. Ceram. Soc., 94 (2011), p. S128.
- (12) 伊藤義康, 機械の研究, 47 (1995), p. 34.
- (13) Toma D., Brandl W., Köster U., Surf. Coat. Technol., 120-121 (1999), p. 8.
- (14) Zhao L, Parco M., Lugscheider E., Surf. Coat. Technol., 179 (2004), p.272.
- (15) Kitazawa R., Kakisawa H., Kagawa Y., Surf. Coat. Technol., 238 (2014), p. 68.
- (16) Manap A., Seo D., Ogawa K., Mater. Sci. Forum, 696 (2011), p. 324.
- (17) Schulz U., Menzebach M., Leyens C., Yang Y.Q, Surf. Coat. Technol., 146-147 (2001), p. 117.
- (18) Guo S., Kagawa Y., Ceram. Intern., 32 (2006), p. 263.

付録A

 $\epsilon \times R(T)$ (A1)

また, *T*_s℃のサセプター表面から放射された熱エネル ギーが試験片から反射されたものは,

$$(1 - \varepsilon) \times R(T_s) \tag{A2}$$

で表わせ,最終的に放射温度計に入力される反射エネル ギーは,

$$\beta(1-\varepsilon) \times R(T_s) \tag{A3}$$

となる。ここで、 β は光学補正係数である。(A1)及び (A3)式から放射温度計に入る総エネルギー $R(T_t)$ は、

 $R(T_t) = \varepsilon \times R(T) + \beta(1 - \varepsilon) \times R(T_s)$ (A4)

となる。よって、試験片表面の真温度T^{\circ}には $R(T) = \beta(1-\epsilon) \times R(T)$

$$R(T) = \frac{R(T_t) - p(1 - \varepsilon) \times R(T_s)}{\varepsilon}$$
(A5)

式より求めることができる。

実際には、反射補正付変換器(IR-GBG、(㈱チノー) を用いて式(A1)~(A5)で与えられる式より補正を行い、試験片表面の正確な温度情報を検出した。温度校正 作業として試験片表面とサセプターにR熱電対を取りつ け、試験片表面の熱電対から出力される温度情報と放射 温度計から出力される温度情報が一致するように放射 温度計の放射率値と反射補正付変換器の光学補正係数 値を調整した後に実験を行った。この温度校正作業は、 300℃、600℃、900℃及び1200℃にて一定の温度で行っ た。その結果、放射温度計の放射率値を $\epsilon = 0.5$ 、反射 補正付変換器の光学補正係数値を $\beta = 0.95$ と決定した。



Fig. A1 Correction of the temperature detected by pyrometer.