

蛍光分光法による遮熱コーティングの TGO層における残留応力の評価

福岡工大[院] ○福田晋久 福岡工大 朱世杰

Evaluation of Residual Stress in TGO Layer of Thermal Barrier Coating by Fluorescence Spectroscopy

Kunihisa FUKUDA and Shijie ZHU

1 緒言

航空および発電用ガスタービン等の高温部品は、耐熱性の高い超合金が用いられより高い耐熱性を持たせるため、超合金の表面に遮熱コーティング(Thermal Barrier Coating : TBC)を施す。この耐熱コーティングにより、超合金のもつ耐熱性を更に数百℃改善することができる[1]。しかし、実使用環境下において遮熱セラミックスコーティングが超合金から剥離することはシステムにとって致命的である[2,3]。

本研究では、遮熱コーティングの劣化および損傷評価手法の開発を目指して、熱暴露時間の変化にともなう微視組織の変化や界面損傷を観察、繰返し荷重での押し込み疲労試験を行い、残留応力を測定し、遮熱コーティングシステムの損傷機構および熱暴露時間の影響に関する研究を行った。特に、熱暴露試験によりトップコートとボンドコート間に形成される熱生成酸化物(Thermally Grown Oxide : TGO)層の成長及びTGO層の影響について注目した。

2 実験方法

試験片にはNi基合金(In738)基材にボンドコートとして減圧プラズマ溶射によりNiCoCrAlY合金 (~150 μ m) トップコートとして、大気プラズマ溶射によりジルコニア(ZrO₂-8wt%Y₂O₃ : ~250 μ m)を施したTBCシステムを大気雰囲気中で熱暴露させたものを使用した。

熱暴露条件は保持温度1150℃で一定とし、保持時間は0, 10, 50, 100, 200hとした。また、キーエンスのデジタルマイクロSCOPE及びSEMを用いて組織観察を行った。(保持時間0hのものは熱暴露を行っていないものであるが、便宜上0hと表記する。)

繰返し押し込み試験については、圧子として直径5mmのセラミックボールを使用し、島津製作所のサーボパルサーを用い、周波数0.1~1Hz、応力比0.1、サイン波、荷重制御にて試験を行った。繰返し押し込み試験を施した試験片の損傷をデジタルマイクロSCOPEにより観察を行った。

残留応力測定は、可視紫外分光装置を使用し、波長488nm (青色光)、出力80mWのAr⁺イオンレーザーにて蛍光スペクトルを採ることにより測定した。また、残留応力の計算は、蛍光スペクトルのピークシフトを $\Delta\nu$ (cm⁻¹)、 Π を係数(7.61 cm⁻¹/GPa)として式(1)を用いて計算を行った[4]。

$$\sigma = \frac{3\Delta\nu}{2\Pi} \quad (1)$$

3 実験結果及び考察

3.1 熱暴露試験

Fig.1は、熱暴露時間が0, 50, 200hの時の遮熱セラミックコーティングの断面をSEMで観察したものである。トップコートとボンドコートとの間に、アルミナなどの酸化物で形成されているTGO層が(a)には見られないが(b)、(c)には見られ、熱暴露時間が長いほどTGO層の厚さが厚くなっていることが分かる。また、TGO層が増大するにつれ残留応力が増加しトップコートが剥離しやすくなると考えられる。

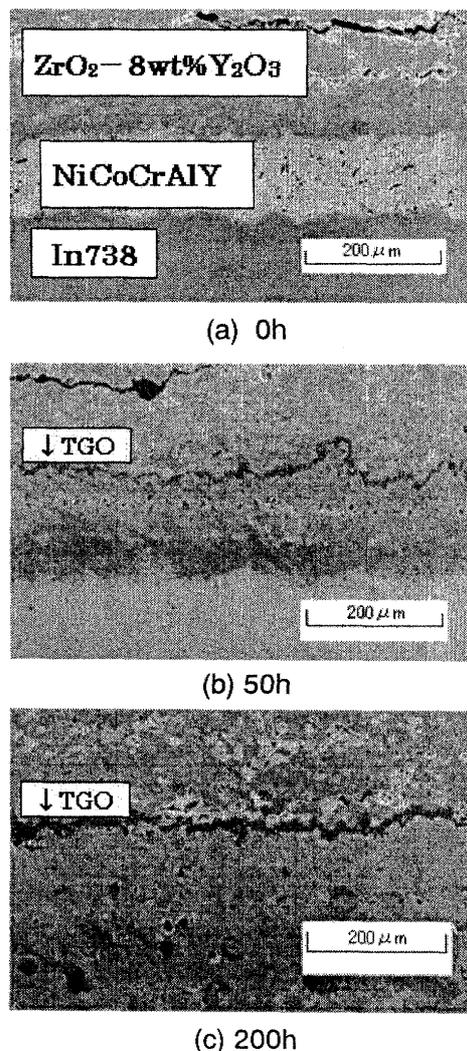
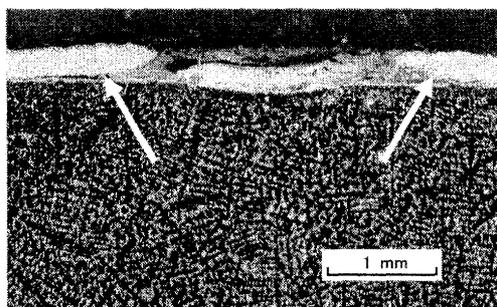


Fig.1 Cross-section of thermally exposed TBC specimens

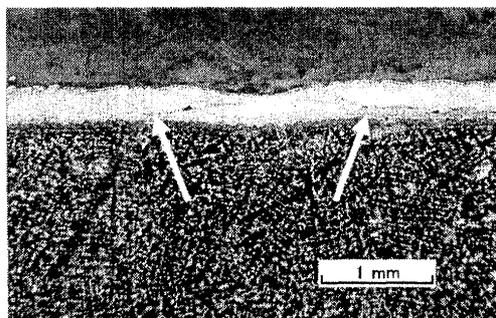
3.2 繰返し押し込み試験

TGO試験片の界面に擬似的な亀裂を導入する目的で、荷重7000N、周波数0.1Hz、応力比0.1で、熱暴露時間0, 10, 50, 100, 200hの試験片にそれぞれ3万回まで繰返し押し込み試験を行った。ただし、200hのものは300回付近で大規模な剥離を呈したため、そこで試験を中止した。また、この実験で使用した試験片の断面の写真をFig.2に示す。(a)は熱暴露0hの試験片の断面であるがトップコートとボンドコートの界面上に亀裂が入っている。また(b)、(c)にはトップコートとTGO層の界面上に亀裂が入っているのが確認された。

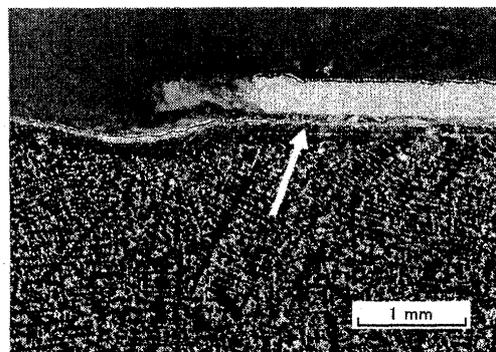
熱暴露時間200hの試験片では剥離を見たが、ほかの試験片では表面損傷が殆ど見られなかった。また、100hまでの試験片の界面亀裂はあまり進展せず圧痕の周辺に留まったため円形の小規模な損傷が観察されたが、200hの試験片は残留応力が高くなったため界面亀裂がTGO層に沿って進展し、大規模な剥離を呈したと考えられる。



(a) 0h



(b) 50h



(c) 200h

Fig.2 Interfacial damage and spalling

3.3 残留応力測定

熱暴露した試験片及び繰返し押し込み試験を行った試験片の中心部分(圧痕の中心付近)を高速カッターで切断し、研磨を行った後、断面のTGO層の残留応力を各試験片10~12点測定を行った。

Fig.3に熱暴露時間ごとの平均残留応力についてのグラフを示す。繰返し押し込み試験により、大規模な界面亀裂が発生した試験片(亀裂あり)の残留応力は、繰返し押し込み試験を行わなかった試験片(亀裂なし)より高くなっており、また、熱暴露時間が長くなるほど残留応力が高くなっていることを確認した。ただし、"亀裂あり"の残留応力の平均値は圧痕部分で測定したものは除外している。

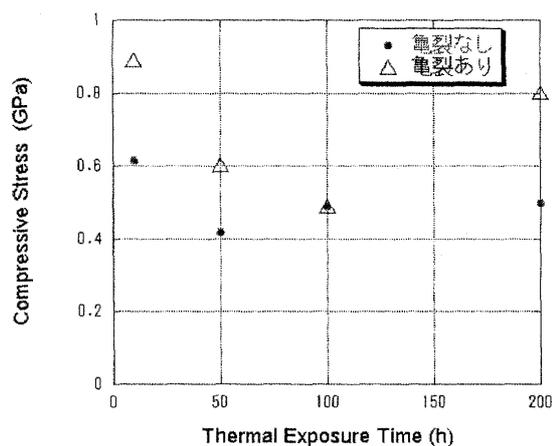


Fig.3 Compressive Stress versus Thermal Exposure Time

4 結言

本実験で得られた結果は次の通りである。

- (1) 熱暴露時間が0~200hのTBCの断面をSEMで組織観察し、熱暴露時間が長いほどTGO層が厚くなることがわかった。
- (2) 繰返し荷重の押し込み試験において、最大荷重は亀裂発生荷重より小さくても、疲労亀裂発生・伝ばによるトップコートの剥離が確認された。
- (3) 熱暴露時間200hの試験片において、TGO層に沿った界面亀裂の進展と大規模な剥離が確認された。
- (4) 熱暴露時間の増加および界面亀裂の発生により残留応力が増加したことを確認した。

参考文献

1. N.P. Padture, M. Gell, E.H. Jordan, Science, 296 (2002) 280.
2. L. Gao, M. Kato, K. Nakasa, T. Bansyo, H. Nishida. J. Soc. Mat. Sci., Japan, 51 (2001) 101.
3. T. Tomimatsu, S. Zhu, Y. Kagawa, Acta mater., 51 (2003) 2397.
4. E.A.G. Shillington, and D.R. Clarke, Acta mater., 47 (1999) 1297.