305 遮熱コーティングのはく離過程における多数き裂の成長シミュレーション

Simulation Analysis of Multiple Cracking in the Process of TBC Delamination

○学 関口真路 (名城大院) 正 藤山一成 (名城大理工)
学 金子大介 (名城大院) 学 水野吉重 (名城大院)

Shinji SEKIGUCHI, Graduate School Meijo University, 1-501, Shiogamaguchi, Tenpaku-ku, Nagoya

Kazunari FUJIYAMA, Meijo University, 1-501, Shiogamaguchi, Tenpaku-ku, Nagoya

Daisuke KANEKO, Graduate School Meijo University, 1-501, Shiogamaguchi, Tenpaku-ku, Nagoya

Yoshishige MIZUNO, Graduate School Meijo University, 1-501, Shiogamaguchi, Tenpaku-ku, Nagoya

Multiple crack simulations were conducted on the delamination process of thermal barrier coating applied to gas turbine blades using the polycrystal FEM model of thermal cycle test pieces. The simulation results of multiple cracks during the thermal cycle showed quite similar morphology to the observation on test pieces by modifying the Young's modulus of topcoat layer according to the fraction of pore. Moreover, statistical distribution of crack length also showed similar trend with the measured result. Therefore this polycrystal model could be an effective tool for the analysis of crack morphology and distribution in the delamination process of TBC.

Key word : Thermal Barrier Coating, Thermally Grown Oxide, Multiple Cracking, Spalling Stress, Finite Element Method,

1. 緒言

地球温暖化対策やエネルギー節約などの観点から、発電用ガスタービンの高温・高効率化が進められている。その中で、高温燃焼ガスにさらされる翼部材の遮熱性を向上させるためセラミックスを基材の表面に被覆させた遮熱コーティング(Thermal Barrier Coating : 以後TBC)技術が広く適用されている。TBCはボンドコート(NiCoCrAlYまたはNiCrAlY)とトップコート($ZrO_2-8wt\%Y_2O_3$: 部分安定化ジルコニア)から構成されるが、高温で使用する間にトップコートとボンドコートの間に酸素が浸透し酸化層(Thermally Grown Oxide : 以後TGO)が形成される。このTGOはトップコートの応力を上昇させ、き裂の発生・成長と、はく離の原因になると考えられる。トップコートのはく離は、トップコート粒における微小なき裂の発生・成長・合体の結果生じるが、その複雑なプロセスを正確に予測できる方法の確立が求められている。そこで、本研究ではTGO形成によってトップコートに生じる応力分布を空孔の存在を考慮して求め、き裂発生・成長のシミュレーション解析を行うと共に、き裂の発生形態とその分布について検討した。

2. 解析方法

2.1 モデル作成

Fig.1 にSEMによる観察結果および今回使用した有限要素解析モデルを示す。FEMモデルはトップコート組織写真¹⁾から求めた粒形分布データと統計的に等価なボロノイモデルを作成し、トップコートの結晶粒集合体として利用したものである。ただし、ボロノイセルのアスペクト比が計測結果とほぼ一致するようにトップコート厚さ方向に寸法を圧縮した。また、各セルの境界を接触要素で構成した。

この解析はSEM断面観察により界面上下の高さ計測の結果、20 μm 程度であったのでトップコートとボンドコートの界面を余弦波とする振幅 20 μm 、1/2 周期モデルを用いトップコートの長さ、ボンドコートの長さを共に 200 μm とし、解析には汎用有限要素法プログラム Marc Ver2005 を用いた。また、両側面は周期境界条件とした。

2.2 材料定数

トップコートは $ZrO_2-8wt\%Y_2O_3$ の文献²⁾による定数値を用いヤング率を 36.6(GPa) ポアソン比を 0.29、熱膨張係数を $5.1 \times 10^{-6}(1/K)$ 、とするが、空孔の存在により機械的性質が変化するため、以下の式⁴⁾によりトップコートのヤング率を補正した。

$$E = E_0(1 - bP) \quad (1)$$

Fig.1 The finite element model of TBC

ここで E_0 は空孔率 0 のときのヤング率、 P は空孔率、 b は材料により変化する値である。本研究では $b=2.0$ とした。

ボンドコートはNiCoCrAlYを使用し、ヤング率を 150.9(GPa)、ポアソン比 0.07、熱膨張係数を $9.4 \times 10^{-6}(1/K)$ とした。また、TGOは Al_2O_3 とし、ヤング率 356.0(GPa)、ポアソン比 0.24、熱膨張係数 $8.0 \times 10^{-6}(1/K)$ と定め、アルミニウムが酸化されて Al_2O_3 に変わるときの体積の変化を示すPilling-Bedworth比(PB比)=1.28を使用し、TGO発生による体積膨張を模擬した。

2.3 解析条件

20℃から 1100℃に温度を変化させ、900℃から 1100℃の粒界結合力の平均値を各粒界の結合力として与えた。さらに、粒界に存在する空孔の寸法計測結果からその統計分布を対数平均 $\mu_{Le}=1.138$ 、対数分散 $\sigma_{Le}^2=0.339$ (単位 μm)の対数正規分布で表し、乱数を発生させて粒界結合力を次式により設定した。

$$\sigma_d = \sigma_0 \frac{l_g - \sum l_p}{l_g} \quad (2)$$

σ_d は空孔による損傷粒界結合力、 σ_0 は粒界結合力、 l_g は粒界長さ、 $\sum l_p$ は一粒界中の空孔長さ総和である。

2.4 き裂

粒界結合力 σ_d を式(2)によってランダムに配置し、TGO発生後のモデルについて 10 パターン行うことで発生するき裂長さの統計データをとした。このとき、TGO厚さは 2 μm とした。

次に文献に示された熱サイクル付与(100 サイクル)後のTBCの写真¹⁾によりき裂長さを測定し、それを対数正規分布により近似した。温度を2.3項のように与え、さらにき裂発生後、常温に戻したときの残留応力解析を行った。

3. 解析結果および考察

3.1 応力分布

Fig.2(a)は TGO が 2 μm 発生した状態で均質材として粒界を完全に結合した状態で解析した結果である。この場合、界面谷部に膜厚方向の高い引張応力が分布している。

同じく TGO 厚さを 2 μm とし、粒界結合力を設定したときの解析結果を Fig.2 (b)に示す。この結果においてき裂は界面谷部に多く発生する結果が得られた。

Fig.3 に山部および谷部における膜厚方向のき裂発生後の残留応力分布を示す。残留応力の分布から谷部膜厚方向面応力に比べ、山部膜厚方向応力が一部高い応力を示している。応力レベルは、文献による実験値³⁾と同等レベルである。残留応力が谷部より山部の方が大きくなるのは谷部のき裂発生により応力が開放されたためと考えられる。山部に向かってそのき裂が最終的には離れき裂に成長していくことが本解析により予測される。

以上よりトップコート内のき裂発生応力を求める方法として、空孔の分布を考慮した粒界結合モデルが有効であると考えられる。

3.2 き裂長さ分布

Fig.4にFig.2(b)の条件で求めたシミュレーションによるき裂長さ分布と文献による実測定データ¹⁾のき裂長さ分布を比較して示す。両者の分布形はよく一致している。

Fig.5 にき裂計測により得たそれぞれのサイクルの対数平均と対数分散の変化を示す。対数平均はサイクル数が増加するに従い上昇し、対数分散はわずかに減少する傾向にあることがわかる。

以上よりトップコート内のき裂分布がトップコート粒の大きさの分布と結合力の不均一性を用いたモデルによって再現可能であることを示唆している。

4. 結言

トップコート粒径と形状の不均一性、粒内結合力の不均一性を考慮したモデルを用いて、き裂発生形態の解析を行った結果次の結論を得た。

- (1)TGO の存在により、き裂発生前には界面谷部に応力が高い部分が生じた。
- (2) き裂発生後の残留応力レベルはX線応力測定結果と近い値を示した。
- (3)実験結果とシミュレーション結果におけるき裂長さの統計分布形はよく一致し、今回使用した多結晶モデルはトップコートの損傷形態の再現に有効であった。

Fig.2 FEM analysis results of TBC

Fig.3 Distribution of spalling stress

Fig.4 Log-normal distribution of crack length

Fig.5 Logarithm average and logarithm distribution

5. 参考文献

- 1)日本材料学会高温強度部門委員会, 超合金とそのコーティング材の高温強度評価技術ワーキンググループ, 第Ⅱ期活動成果報告書, (2005).
- 2)金子大介 他 4 名, 日本機械学会 2006 年度年次大会講演論文集 (1), pp.522-523 (2006).
- 3)鈴木賢治, 久保貴博, 田中啓介, 秋庭義明, 尾角英毅, 材料 53, 734, (2004).
- 4)守吉佑介 他 6 名, セラミックスの焼結, 内田老鶴圃, (1995).