G030024

応力拡大係数を用いた熱遮蔽コーティングのはく離成長挙動の評価

関原 傑^{*1} 有川秀行^{*1}Evaluation of Delamination Growth Behavior of Thermal Barrier Coatings
by Stress Intensity FactorMasaru SEKIHARA^{*1}, Hideyuki ARIKAWA^{*1}^{*1} Hitachi Ltd., Hitachi Research Laboratory
Saiwai-cho 3-1-1, Hitachi-shi, Ibaraki, 317-8511 Japan

Thermal barrier coating (TBC) has been applied to the high-temperature parts of gas turbines to enhance thermal efficiency by raising the firing temperature. Various uncertain factors remain in the estimation of the delamination behavior of TBC. An investigation was conducted experimentally and computationally to develop an evaluation method using the optimal fracture mechanics parameters to estimate the delamination behavior of TBC accurately.

Results showed that, while delamination initiation lives decreased under the 60-min hold condition, there was little effect on the delamination growth rate. Finite element analysis was then performed to calculate the stress intensity factor range (ΔK) of a slit-like assumed delamination tip. It was concluded that delamination growth behavior can be estimated by using mixed mode ΔK .

Key Words: Thermal Barrier Coating, Delamination, Stress Intensity Factor

1. 緒 言

近年、発電効率の向上が強く求められてきている。このため火力発電のさらなる高効率化を実現する技術開発は以前にも増して重要となっている。特にコンバインドサイクルプラント (CC) は、高い熱効率を達成できるとともに、燃料として天然ガス、シェールガスを用いることができることから、その注目度は高い。CC では主機であるガスタービンの熱効率が特に重要であり、作動流体の高温化は効率の向上に極めて効果的であるものの、部材に使用される金属の耐用温度が制約となってきた[1, 2]。近年、高温化の手法として、高温ガスに曝される金属表面に熱伝導率の低いセラミックコーティングを施工する熱遮蔽コーティング (TBC) 技術が主流となりつつある。本研究では、TBC のはく離発生/成長挙動に及ぼす高温下での保持時間の影響、はく離成長を評価できる破壊力学パラメータ、について実験的および解析的に検討を行った。

2. 試験および解析手法

試験体の形状を図 1 に示す。母材にはニッケル基の耐熱超合金を用いた。本研究では、セラミック層の膜厚を 0.6mm とし、平行部の幅が 10mm の試験体を用いた。熱機械疲労を模擬する負荷パターンとしては、温度と荷重が逆位相で増減する Out of Phase を選定した。これは実機の熱機械負荷を簡便かつ精度よく再現できるパターンであると考えられるためである[3]。温度、ひずみおよび保持時間の条件を表 1 に示す。

試験体を模擬した有限要素法解析を、汎用の構造解析ソフトウェアである ANSYS9.0 にて行った。節点数は約 30,000、要素数は約 26,500 程度の解析規模とし、対称性を考慮して試験体の 1/8 をモデル化した (メッシュ図割愛)。前述したようにセラミック層の厚さは 0.6mm、合金層の厚さは 0.1mm の 1 種類を選定した。また長手方向に

^{*1} 正員, 株日立製作所 日立研究所 (〒317-8511 茨城県日立市幸町 3-1-1)
E-mail: masaru.sekihara.ee@hitachi.com

変位を負荷し、試験体平行部の評点間距離(16mm)に所定の変位を与えることで負荷ひずみを模擬した。はく離の形状は幾種類も想定できるが、本研究では取り扱いを簡単とするためにはく離長さをパラメータとした平行なスリット状とした。応力拡大係数の算出は、はく離の先端付近での開口変位を求め、算出した応力拡大係数範囲の平均値を用いた。

Table 1 Test conditions.

No.	Loading pattern	Temp. (°C)	Strain range (%)	Freq.	Hold time (min)
1	Out of phase	450 - 950	0.7	5.56 × 10 ⁻⁴	0
2	"	"	"	"	10
3	"	"	"	"	60

Fig. 1 Test specimen.

3. 結果及び考察

3.1 はく離進展試験結果

試験保持時間がはく離長さの成長挙動に及ぼす影響について検討を行うために、はく離長さ（最大はく離長さで無次元化）と繰り返し数の関係を整理した結果を図2に示す。図より、保持無し試験条件と10分保持試験条件では、ほぼ同等のはく離成長挙動を示したのに対して、60分保持試験条件では、同じはく離長さに達する繰り返し数は、保持無し試験の約半分に低下した。このことから、短時間の保持と比較して酸化などの影響がより顕著となる長時間の保持により、はく離成長挙動は大きな影響を受けることが明らかとなった。

Fig. 2 Effect of hold time on delamination behavior.

Fig. 3 Relationship between stress intensity factor range and normalized delamination length.

3.2 破壊力学パラメータ解析結果

はく離先端でのセラミック層とメタル層の相対開口変位 (Δu , Δv , Δw) から、各モードの応力拡大係数範囲を求めることとした[4]。ここで、 u は試験片長手方向、 v は試験片長手方向に直交かつセラミック層に平行な方向、 w は試験片長手方向に直交かつセラミック層に直交する方向の変位である。なお負荷中の平均温度を 700°C と仮定して、縦弾性係数、ポアソン比を評価に用いた。応力拡大係数範囲のモード毎に図示した結果を図3に示す。

ΔK_{II} および ΔK_{III} の値は、はく離長さとともに増加する一方で、 ΔK_I の値ははく離長さとの関係は見られなかった。このことから、はく離端が面外に開口するモードは、はく離の成長とは関連性が低いことが分かった。一方で、 ΔK_{II} および ΔK_{III} の面内せん断および面外せん断モードは、はく離の成長と密接に関連していることが明らかとなった。

はく離成長速度と破壊力学パラメータの関係を図9に示す。 ΔK_{II} および ΔK_{III} の面内せん断および面外せん断により、はく離の成長が表現できる可能性があることが分かった。どちらのモードが支配的かは現時点では明らかではないが、せん断の混合モードとなっていると考えられる。

Fig. 9 Effect of hold time on relationship between delamination growth rate and stress intensity factor.

4. 結 語

ガスタービン高温部品に用いられる熱遮蔽コーティング (TBC) のはく離成長挙動の解析手法開発を目的として、はく離発生・成長挙動に影響を及ぼす保持時間の影響、はく離成長挙動を取り扱うことのできる破壊力学パラメータ、について実験的、解析的に検討を行い、以下の結論を得た。

- (1) 保持時間をパラメータとし、はく離成長試験を行った。10 分保持では保持なしと同等の結果となったものの、60 分保持でははく離発生寿命が短くなること、はく離成長挙動は影響を受けないこと、を明らかとした。
- (2) はく離の成長挙動を取り扱うことを目的として、試験体のはく離形状をスリット状と仮定して有限要素解析を行い、はく離先端の応力拡大係数範囲をモード I, II, III それぞれの値を求めた。はく離の成長とモード II およびモード III との間に相関が認められ、これらの混合モードを仮定することが可能であると考えられる。

文 献

- (1) 吉葉, “耐熱コーティング技術の展望”, 日本ガスタービン学会誌, Vol.30, No.6 (2002).
- (2) 児島, 有川, “発電用ガスタービンコーティング技術”, 日本ガスタービン学会誌, Vol.30, No.6 (2002).
- (3) 関原, “熱機械疲労下における熱遮蔽コーティングのはく離挙動”, 材料, Vol.58, No.9, pp.759-766 (2009).
- (4) 岡村, “線形破壊力学”, 培風館 (1976) .
- (5) Annigeri, “Life Assessment of Thermal Barrier Coatings for Gas Turbine Applications”, ASME Turbo Expo 2000 (2000).
- (6) 松崎, 川村, “遮熱コーティングの寿命推定”, 日本ガスタービン学会誌, Vol.30, No.6 (2002).
- (7) 小川, “熱遮蔽コーティング(TBC)材の経年劣化機構解析”, 日本機械学会論文集, A 編 (2000).
- (8) Tomimatsu, Zhu, and Kagawa, “Effect of Thermal Exposure on Stress Distribution in TGO Layer of EB-PVD TBC”, Acta Material 51 (2003).