

機関番号 : 32660

研究種目 : 基盤研究 (C)

研究期間 : 2008~2010

課題番号 : 20560087

研究課題名 (和文) 遮熱被膜の高温疲労剥離強度に関する研究

研究課題名 (英文) Study on Delamination Fatigue Strength of Thermal Barrier Coating at Elevated Temperature

研究代表者

金子堅司 (KANEKO KENJI)

・東京理科大学・工学部・機械工学科・教授

研究者番号 : 40016803

研究成果の概要 (和文): ガスタービン翼などに用いられる遮熱被膜のはく離強度評価について、熱負荷やその繰り返しによる損傷や特性変化・酸化膜の形成あるいははく離強度の評価を実験的かつ解析的に検討した結果以下の知見が得られた。なお、本研究では(a)リング試料によるそぎ落としせん断試験, (b)円筒試料による繰り返しせん断試験, (c)棒状試料による高温引張り繰り返し試験, (d)板状微小試料によるそぎ落としせん断試験, (e)ピンテスト試料によるねじり・引張り複合負荷試験など種々の強度評価法についても評価を行った。実験では熱負荷前と900°C~1100°Cで60時間程度までの加熱処理を行った後の強度評価や組織変化あるいはまたはく離形態の観察を行った。解析では熱負荷による界面近傍での応力ひずみ・残留応力解析を行った。

(1)加熱時間が長く加熱温度が高いほど酸化物(TGO)層の成長量は大きい。(2)熱負荷による基材の膨張,それに伴うBCの伸び変形から冷却時において界面凸部に高いはく離応力が発生する。一方,延性が低いTCにき裂が生じ,せん断応力による界面でのはく離が発生する。(3)はく離強度は加熱初期には上昇するが,長時間加熱では減少する。(4)本実験の条件では,はく離強度はTGO層厚さよりも,相互拡散による界面強度上昇およびTCの焼結による強度上昇・BCの劣化に影響を受けると考えられる。(5)き裂の発生は温度によって中間層BCから生じる場合(400°C以下)と表面層TCから生じる場合(700°C程度以上)がある。この原因はBCの延性特性の温度による変化が要因であろう。(6)はく離の発生はTCに生じた垂直き裂によってできた島状の部分から生じる。(7)はく離は基材のクリープ伸び変形の増大あるいはTCの焼結による収縮に因ると考えられる。(8)板状微小試験片を用いる新たなそぎ落としせん断試験法の有用性を示した。(9)ねじりピンテスト法において,ピン直径と被膜厚さが強度評価結果に及ぼす影響を実験的に確認した..

研究成果の概要 (英文):

In this study, it is investigated experimentally and analytically that fracture process and fatigue behavior of Thermal Barrier Coatings (TBCs) used in a high temperature component in a land based gas turbine. The effects of the thermal load on TBCs and delamination strength are investigated by measuring residual stress of top coat, using the finite element method and various cyclic shearing, tensile and torsion tests.

It is found that (1)the TGO layer thickness increases with increasing heating time for both cases of 900 and 1000°C, and it saturates gradually after 20 hours for the both cases. (2)A delamination of top coat under thermal load occurs at a peak of undulation in top coat and bond coat interface. This is because that tensile tearing stress which is normal to the interface occurs at the peak area after cooling. So, about failure patterns of TBCs, we can find two patterns, the first one is that a crack initiates at TC surface and propagates in the thickness direction. After the crack arrives near the interface, a delamination occurs at the interface and grows. Another pattern is that a local delamination can be observed without any crack grown from the TC surface. In the both cases, it is observed that

delaminations run from a peak to peak of undulation of BC near the interface. (3)It is found that the mechanical property of bond coat changes after thermal aging and the shear fatigue behavior of TBCs is affected by bond coat strength. (4) Delamination energy increases quickly with increasing heating time up to 40 hours and then decreases slightly. So, the delamination strength of TC is thought to decrease apparently after long time heating. This is because that residual stress in TC increases and so elastic strain energy increases with increasing heating time. (5) Softening of BC caused by long heating makes fatigue life of TBCs small.(6)We can find that the shearing using small plating specimens gives reliable data with small scatter bands on delamination strength. (7)Also, the torsion pin-test was found to be a good method which obtains a delamination strength of thermal sprayed coating under combined shearing with tensile stresses.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,700,000	810,000	3,510,000
2009年度	700,000	210,000	910,000
2010年度	300,000	90,000	390,000
年度			
年度			
総計	3,700,000	1,110,000	4,810,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・機械材料・材料力学

キーワード：①遮熱被膜、②高温疲労、③剥離強度、④残留応力、⑤酸化層、⑥応力集中

1. 研究開始当初の背景

1350～1500℃級ガスタービンの翼などに利用されている超高温遮熱セラミックコーティングは熱負荷や高温酸化による剥離損傷によって、その遮熱機能が失われ、翼の大幅な寿命低下を招く。このような部材の寿命の正確な評価および長寿命化のための設計上の検討を精度よく行う必要性が叫ばれている。

2. 研究の目的

本研究では高温での酸化や熱負荷の繰り返しが遮熱被膜の剥離強度に及ぼす影響を実験的かつ解析的に明らかにするとともに、寿命評価規準を明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

こうした目的を達成するために、本研究においては高温下で被膜界面に酸化膜を形成したリング状試験片と円筒突き合せ試験片あるいは板状微小試験片を用い、実機の負荷状態に即した熱応力・高温せん断剥離強度試験と実験条件に対応する非弾性応力ひずみ解析を行うことで応力特異場における腐食疲労剥離限界条件を定量的に精密に求める。また、高温下での非弾性解析を精度よく行うために被膜・基材の高温非弾性構成式の構築を併せて行う。併せて従来のピンテスト法を改良したねじりピンテスト法の有用性につい

て WC-Co 被膜を対象とした検討も行う。

4. 研究成果

・はく離損傷形態について

(1) 熱負荷による引張り熱応力によってトップコート(TC)層にき裂が生じる損傷パターンはよく知られるところであるが、それ以外に、熱応力に伴うボンドコート(BC)層の塑性変形によって温度低下時に TC/BC 界面に垂直応力が発生し、はく離が生じる損傷形態を確認した。はく離は TC 層内で生じ、TC / BC 界面の BC 層凸部を起点とする。

(2) 長時間の加熱は TBCs 中の BC 層の劣化と TC 層中の界面近傍の残留応力の増大を招くこと、それが剥離強度と疲労強度の低下につながることをせん断そぎ落とし試験とねじりせん断繰り返し試験によって確認した。

・新たに開発した削ぎ落としせん断試験法について

(1) 本試験法によって被膜の付着強度の正確な評価が可能であることが分かった。

(2) せん断荷重位置は TC 厚の 85% が最適である。

(3) 平均せん断応力 τ は、試験片厚み依存性があるので解析的な検討を行う必要がある。

・削ぎ落としせん断試験で得られた結果について

(1) 平均せん断応力 τ は加熱時間が 5 万秒

まで上昇し、5万秒以降は減少する。

この理由として破断面の観察から、加熱初期はTCとBCの界面強度増加、加熱時間5万秒後は更なる加熱によるTGO成長で界面強度の低下が確認された。

・ねじりピンテスト法については、

(1) ピン径が小さいほど、被膜厚さが厚いほど、引張負荷が小さいほど見かけのはく離強度は高くなる。ただし、被膜厚さについては400 μ m程度以上であれば安定した結果が得られる。

(2) せん断はく離強度について確度の高い結果が得られ、今後解析的な検討を行い、強度基準が明確となる可能性が高い。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計4件)

(1) 金子堅司・大森明, Evaluations of Strength of Thermal Sprayed Coating for Complex Loading, Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, 査読あり, 4(2010) pp.264-273

(2) 金子堅司・高藤聡・榎本和城, Study on Shear Fatigue Fracture and Delamination Mechanism of Thermal Barrier Coatings After Thermal Loading, Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, 査読有り, 4(2010) pp.315-324

(3) 金子堅司・高藤聡・榎本和城, 熱負荷を受けた遮熱被膜のせん断疲労破壊とはく離機構に関する研究, 日本機械学会論文集A編, 査読有り, 76(2010)pp.853-859

(4) 金子堅司, Study on Adhesive Strength Criterion under Complex Stresses, Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering (ONLINE ISSN : 1880-9871), 査読有り, 3(2009)pp.49-63

[学会発表] (計6件)

(1) 金子堅司・榎本和城, 遮熱被膜の付着強度と残留応力に及ぼす高温酸化の影響, 日本材料学会講演会講演論文集(2008) pp287-288

(2) 金子堅司・榎本和城, ねじりピンテスト法による溶射被膜の付着強度評価に関する研究, 日本機械学会材料力学講演会, (OS0805) CD-ROM

(3) 金子堅司・高藤聡・榎本和城, 熱負荷を受けた遮熱被膜のせん断疲労破壊とはく離機構に関する研究, 日本機械学会 第17回機械材料・材料加工技術講演会, 2009-11, 富山・国際会議場

(4) 金子堅司・大矢将人, そぎ落としせん断試験による遮熱被膜の付着強度評価, 日本機械学会 M&M2010 (材料力学カンファレンス) (2010-10)長岡

(5) 金子堅司・檜垣圭太朗, ねじりピンテスト法による溶射被膜の付着強度評価に関する研究, 日本機械学会 M&M2010 (材料力学カンファレンス) (2010-10)長岡

(6) 金子堅司・近藤英明, 遮熱被膜の高温におけるはく離発生および進展挙動に関する研究, 日本機械学会 第18回機械材料・材料加工技術講演会(M&P2010)講演論文集, CD-ROM, (2010-11)東京大学

[図書] (計1件)

(1) 社)日本材料学会編, 社)日本材料学会, 界面強度評価ハンドブック(2010)235

[産業財産権]

○出願状況 (計 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年月日:

国内外の別:

○取得状況 (計◇件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

取得年月日:

国内外の別:

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

金子堅司 (KANEKO KENJI)

東京理科大学・工学部・機械工学科・教授
研究者番号: 40016803

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号: