

審査の結果の要旨

氏名 田中 誠

セラミックス熱遮蔽コーティングは発電機や航空機に用いられているガスタービンエンジン部材に欠かせない技術である。これらの機器ではコーティング層が基材から剥離すると基材が高温に直接さらされることになり、部材の寿命を著しく短くし、大事故につながる危険性を持っている。従って、コーティングが施された部材を安全安心に利用するためにはコーティング層の損傷を正しく測定評価し、剥離を未然に防止することを可能にする技術の開発が不可欠なものと考えられている。

本論文は「セラミックス熱遮蔽コーティングの損傷評価手法の開発」と題し、セラミックス熱遮蔽コーティングの安全安心な利用技術に貢献することを目指して行われた研究であり、全6章よりなる。

第1章は序論であり、電子ビーム物理蒸着法(EB-PVD法)により耐熱金属部材表面に ZrO_2 系セラミックスをコーティングした材料(以後、コーティング自体をTBC(Thermal Barrier Coating)と呼び、コーティングされた材料や部材をTBCシステムと呼ぶ)の現状を述べるとともに実用的な観点から明らかになっている劣化損傷現象を整理した。熱遮蔽コーティング層の剥離現象について、破壊力学を用いたTBC層の基材からの剥離条件をもとに、剥離寿命予測手法に必要な要素技術を整理した。この結果、せん断負荷条件下での界面剥離靱性の定量的評価、剥離部分の高空間分解能での非接触・非破壊検出、任意の応力状態での熱機械疲労試験装置の開発、が残された重要な課題であることを示した。これらの課題に対する現状での研究開発状況を踏まえて、本研究の目的を明確にした。

第2章では、「TBC層の基材からの剥離抵抗の定量的評価」について述べた。TBCシステム用に開発された新しいプッシュアウト法を用いてせん断負荷条件下でのTBC層の基材からの界面剥離靱性を測定する方法について検討した。EB-PVD法により作製した厚さ $200\ \mu\text{m}$ の Y_2O_3 安定化 ZrO_2 コーティング層をCoNiCrAlY系ボンドコート上に施した超合金基材を試験片として用いた。プッシュアウト法では界面剥離抵抗の変化を、 $8\sim 95\ \text{J/m}^2$ の広い範囲内で定量的に評価することができることを明らかにした。また、高温熱サイクルを加えて劣化を加速させたTBCシステムの界面剥離靱性の変化を求めた。その結果、界面剥離靱性は熱サイクル温度及び回数などの熱サイクル試験条件に依存することを定量的に示すことに成功した。これらの一連の界面剥離靱性の定量評価により、TGO層の平均厚さ、熱暴露時間及び熱暴露温度などの複数の因子に影響されることを明らかにした。

第3章では、「TBC層と基材間の剥離の非破壊検出手法」について述べた。TBC層の剥離現象に破壊力学を適用する際に必要な剥離部分の形状や大きさを非破壊非接触で検出する方法について検討した。まず、第2章で用いたものと同じTBCシステ

ムの TBC 層表面にロックウェル圧子を押し込み、人工的に TBC 層を基材から剥離させた。この剥離は TBC 層の表面から目視では確認することができないが、TGO 層中の応力を蛍光分光法で測定し、TBC 層の剥離の有無による TGO 層の応力の値の変化を利用して剥離部分を 150 μm の高空間分解能で検出可能なことを検証した。この方法を用いて、圧子押し込みをした TBC システムに高温熱サイクル疲労を加え、熱サイクル負荷の増加により TBC 層の剥離部分がバタフライ状に増加していくことを検出することに成功した。また、蛍光分光を用いた方法では、剥離界面によって TGO 層が異なる応力を示す現象を利用して、剥離界面の識別も可能であることを示した。

第 4 章では、「TBC システムの劣化損傷シミュレーション装置の開発」について詳細に説明した。平板の試験片を用いて、TBC 層内に温度勾配を付与することができ、熱負荷と力学負荷を同時に加えることが可能な熱機械疲労試験装置(以後、TMF 試験装置と記す)を開発した。第 2 章と同様の TBC システムの平板試験片を用いて開発した TMF 試験装置の性能を調べた。開発した TMF 試験装置では、間接誘導加熱システム及び圧縮空気を利用した冷却システムにより、 $\pm 5^\circ\text{C}/\text{s}$ の加熱及び冷却速度を実現した。TBC 層表面温度を 1150°C 及び基材温度を 1020°C に設定した場合には TBC 層中に 130°C の温度勾配を付与した試験が可能になった。実験で用いた TBC システムを試験片として用いた場合、引張及び圧縮負荷は $\pm 200 \text{ MPa}$ の応力レベル、 $\pm 0.2\%$ の力学ひずみの範囲の負荷を加えられることを証明した。設定値からの温度制御の逸脱は 1.5% 以内であり、力学負荷の制御も 3.5% 以内の誤差で行えることを確認した。これらの結果より、開発した TMF 試験装置を用いることにより、実使用環境下での平板状の TBC システムの劣化損傷を調べるための実験的な劣化損傷シミュレーションが可能であることを示した。

第 5 章では、「TBC システムの実験的な劣化損傷シミュレーション」についての結果を述べた。第 4 章で開発した TMF 試験装置を用いて、試験片幅に対して十分に小さな貫通円孔を導入した TBC システム平板状試験片の TMF 試験を行い、実使用環境下に近い条件下で生じる劣化現象を詳しく観察した。高温時に引っ張り負荷が加わる応力制御の条件では、TBC 層の厚さ方向のクラックの発生、発生したクラック近傍のボンドコート層内でボイドの生成、TGO 層の異方性生成挙動などの TMF 試験特有の現象が存在することを明らかにした。また、TBC 平板試験片に円孔を導入し、引っ張り負荷を加えた試験を行うことにより円孔近傍に発生する異なる応力状態を利用して、一つの試験片で異なる力学負荷条件下の現象を知ることができる方法を示した。

第 6 章では、得られた結果を総括している。

以上を要するに、本論文は、セラミックス熱遮蔽コーティングの基材からの剥離寿命評価に破壊力学を適用する際に、実験を通して求めることが必要な値を取得するための新たな手法と、実使用環境下を模擬できる熱機械疲労試験装置開発ならびにその装置を用いた新たな試験方法を提案したものである。これらの結果は、マテリアル工学の分野の発展に大きく貢献するとともに、セラミックス熱遮蔽コーティングの安全安心な利用技術構築に大いに役立つものである。

よって本論文は博士(工学)の学位請求論文として合格と認められる。