

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 3 日現在

機関番号：32660

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2014

課題番号：23560098

研究課題名(和文)超高温ガスタービン用遮熱被膜の高温強度に及ぼす熱負荷の影響に関する研究

研究課題名(英文)Influence of thermal loading on adhesive strength of thermal barrier coating applied to super high temperature gas turbin

研究代表者

金子 堅司(Kaneko, Kenji)

東京理科大学・工学部・教授

研究者番号：40016803

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：溶射被膜の剥離強度の測定法として規格化されているピンテスト法を改良したねじりピンテスト法を提案し、遮熱被膜のような二重構造の被膜の剥離強度評価に適用できることを確認した。これにより、熱負荷を受けた後のはく離強度を正確に測定できた。さらに、界面に生じるせん断応力と垂直応力をそれぞれ正確に制御でき、一般的な複合負荷状態ではく離強度が定量的に評価できることから、被膜システムの開発研究の進展に寄与することが出来た。これに加えて、対応する応力解析を実施し、遮熱被膜とWC-Coサーメット被膜のはく離発生条件を定量的に把握し定式化出来た。また、繰り返し負荷による疲労はく離曲線を採用することにも成功した。

研究成果の概要(英文)：The torsion-tension pin-test method was established to measure adhesive strength of thermal barrier coating (TBC) under combined shear and tensile loading. Using the new test method, adhesive strength of TBC after thermal loading, and adhesive fatigue strength (SN curves) of WC-Co sprayed coating were investigated. Furthermore, stress distributions analyses around the interface edge using the finite element method were performed and the delamination conditions were presented for both TBC and WC-Co coating.

研究分野：材料力学・材料加工

キーワード：遮熱被膜 はく離強度 せん断はく離 疲労はく離 はく離基準 組合わせ応力

1. 研究開始当初の背景

超高温遮熱セラミックコーティングの剥離強度を測定するために、従来様々な方法が試みられてきた。例えば、曲げ試験・引張り試験によって被膜に亀裂を生じさせ、更なる曲げと引張りによって剥離を生じさせその進展を測定する方法や被膜上部からダイヤモンド圧子を押し込み被膜の剥離を生じさせる方法、あるいはまたリング状の試料を引張ることで曲げを付与する方法などが行われているが、曲げや引張りでは基材の変形を伴い、実機での条件とは大きく異なり正確な測定にならない。また、押し込み法では被膜の破断と剥離が同時に起こるため、正確な剥離エネルギーの評価が困難である。こうした状況に鑑み申請者は単層 WC-Co 被膜に対して成功した、円筒突合せ試料の外周部に被覆を行いねじり繰り返しによって剥離強度評価を行う方法を試みたが被膜の疲労も同時に進行するなどの問題点が明らかとなっている。

2. 研究の目的

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・長寿命化のための検討を精度よく行うため、本研究では高温での酸化や熱負荷の繰り返しを受けた遮熱被膜の剥離強度を正確に評価する新しい剥離強度測定方法を提案し確立すると共に本方法を用いて、遮熱被膜システムの寿命評価規程を明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

二層被膜のはく離強度評価にねじりピンテスト試料による実験とリング試料によるせん断試験および板状試料によるせん断実験とをそれぞれ行う。被膜の熱負荷・酸化層形成処理実験では、外表面の目標設定温度 900 ~ 1300、基材部 800 ~ 1200 であり、保持時間として 1000 ~ 1300 で 100 ~ 3000 時間程度である。

繰り返し負荷疲労実験と前年度行った3種類の剥離強度実験に対応した非弾性有限要素解析のための材料基礎データの採取を行い、はく離基準を見出すための解析を実施する。被覆システムの熱負荷時および引張りとせん断荷重が負荷されるときに界面端部の応力ひずみ解析を行う。

4. 研究成果

せん断はく離強度を評価するねじりピンテスト法の有用性を検討する為にピン径3種類、被膜厚さ3種類の条件下での実験及び被膜と基材との界面端部の特異場応力解析を行い、以下の知見を得た。(1) 被膜のはく離がピン界面端部で発生していることから、せん断はく離強度が正確に測定できることを確認した。(2) 被膜が 200 μm 程度と薄い場合、被膜内部での破断が見られ、正確なはく離強度評価とならないこと、400 μm 程度以

上であれば界面でのせん断はく離が生じ、安定した強度評価が可能である。(3) わずかな引張り応力の存在によって被膜内の破断が生じ、はく離強度の低下を招く。(図1参照)

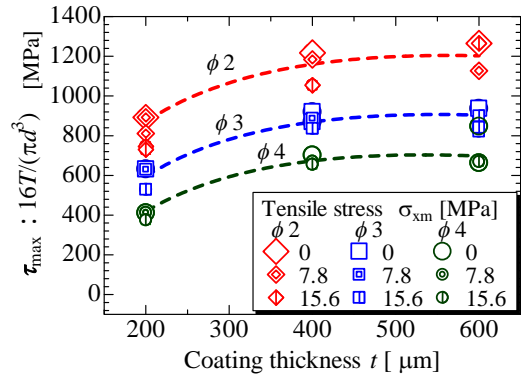


図1 見掛けのせん断剥離強度に及ぼす被膜厚さ、ピン直径及び引張り応力の影響

(4) 有限要素解析によって得た界面端部に生じるせん断・引張応力特異場応力分布を両対数座標で直線近似した結果、引張りとせん断応力の混合負荷モードに対して、はく離強度基準を界面端部の応力の高さを表す界面強度指数 K_s 及び K_a の関数により表す事ができる。(図2参照)

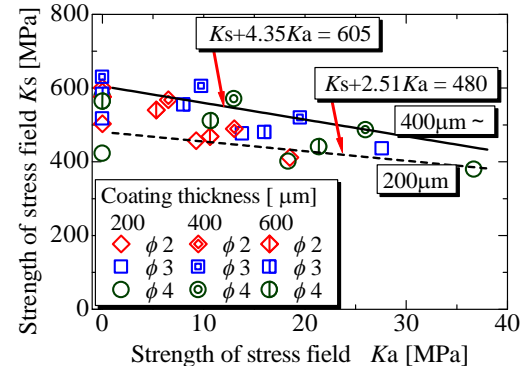


図2 せん断と引張り複合応力下ではく離基準

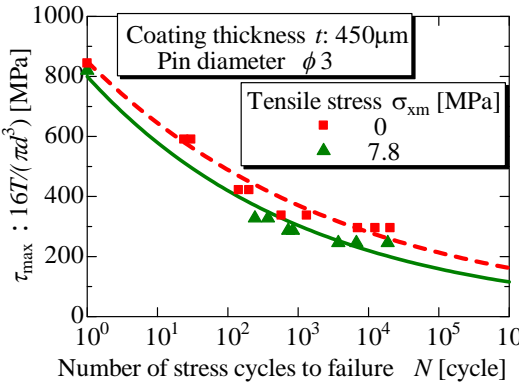


図3 WC-Co 溶射被膜の疲労剥離曲線とその引張り応力依存性

つぎに、ピンテスト専用のねじり引張り疲労試験機を試作し WC-Co 溶射被膜の疲労は

く離強度実験を行った結果、以下の結論を得た。ピン径が大きくなれば見かけ上疲労強度は低くなるが、**疲労強度測定上**ピン径は3でも4でも有効である。引張り荷重を与えることにより、疲労強度は低下することを示し、**引張りとねじりの複合応力下での試験が可能**であること示した。(図3参照)

単純ねじり破壊試験と同様、繰り返しねじり疲労はく離試験においても、小さな引張り応力負荷下でも界面ではなく被膜内部での破断が生じることから、界面の強度評価上注意する必要があることを明らかにした。

23年度において溶射被膜のせん断はく離強度を直接評価するねじりピンテスト法の有用性をWC-Co被膜に対して実験的かつ解析的な検討によって明らかにすることができた。続く24年度においては遮熱被膜に対する実験的検討を行い以下の知見を得た。なお、ピン径3種類、被膜厚さ1種類の条件下で試料の作成を行ったが、ピン径2mmでは技術的な限界からピンをインコネルで製作できず、ピン径3,4mmの試料からしか有効な結果が得られなかった。(1)遮熱被膜は二重被膜であり、トップコート(SYZ)とアンダーコート(CoNiCrAlY)との付着力を測定するためにピンテスト試料にアンダーコート処理した後ピンをわずかにねじることによってアンダーコートはピン端部外周で分断され、その後トップコートを溶射すれば、求める試料の作製が可能である。(2)トップコートのはく離がアンダーコートとの界面で発生していることから、**トップコートのせん**

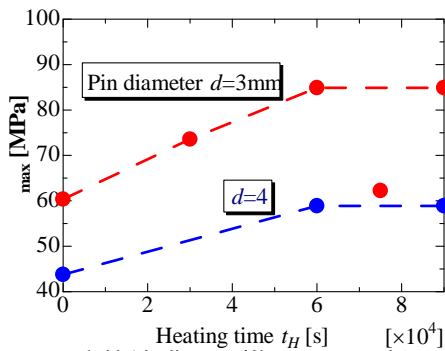


図4 遮熱被膜の見掛けのせん断はく離強度に及ぼすピン直径と加熱時間の影響 (1000)

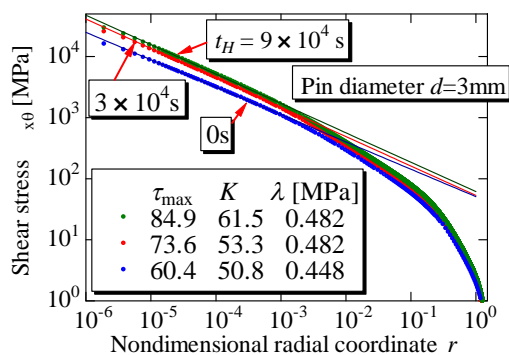


図5 加熱前後のせん断剥離条件下での界面端部せん断応力分布

断はく離強度が直接正確に安定測定できることを確認した。(3)高周波で1000に加熱したブロックを被膜に接触させ、被膜の**加熱処理によってトップコートの付着力が上昇**することを量的に確認した。(図4参照)

(4)ピン径によって見かけの付着強度は異なるが、加熱処理による付着強度の上昇度合いは同様に観察され、ピン径が3~4mmで有効な結果が得られることを確認した。(図4)

実試料の被膜の変形特性を測定するまでには至っていないが、従来得られている他研究者によるトップコートとアンダーコートの変形特性を用いた有限要素解析を行い、せん断応力負荷モードに対して、**はく離強度基準を界面端部の応力の高さを表す界面強度指数 K_s により表す事ができる**こと、およびその値がピン径に依らず同じ値になることを確認した。(図5参照)

つぎに、ピンテスト試料は製作に手間とコストがかかることからより簡便な試験法が実際には望まれる。板材に溶射処理したものをカッターによって細分した小試験片を固定して被膜に界面に平行なせん断力を負荷して被膜をそぎ落とす試験法から得られる付着強度がピンテスト法から得られる結果と一致すれば極めて画期的となる。WC-Co溶射被膜に対して実際にそうした試料を作成して**そぎ落としせん断試験**と対応する応力解析を行った結果、以下の知見を得た。

被膜のそぎ落としせん断試験での見かけの付着強度は試料の寸法(横幅、高さ)、せん断力の負荷位置(界面からの距離)などによって異なること、したがって実験の試料や境界条件に正確に対応した三次元有限要素法解析を行い、破断位置近傍の応力分布等を吟味する必要がある。(図6参照)

WC-Co被膜では弾性解析で済むが遮熱被膜では弾塑性解析を行う必要があり、かなりの計算量となる。

しかし、逆にいえばこうした実験と解析をきちんと行えば被膜の付着強度評価ができる。しかし、行った範囲では界面から剥離が生じる例は少なく、被膜側で亀裂が生じそれが界面へと進展する 경우가多く、界面付着強度としての試験としては厳密さに難がある。

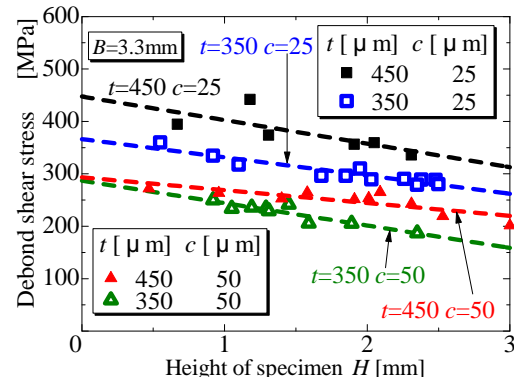


図6 そぎ落としせん断試験結果に及ぼす試料寸法、被膜厚さおよびせん断位置の影響

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(査読有り)論文](計 3件)

(1) Kenji KANEKO and Keitaro HIGAKI "Delamination Strength Evaluation of Thermal Sprayed Coating by Torsion Pin-Test Method", Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, Vol. 5 (2011) No. 12, pp.1042-1050

(2) 金子堅司, 檜垣圭太郎; ねじりピンテスト法による WC-Co 溶射被膜の疲労はく離強度評価, 日本機械学会論文集, 80 巻 818 号 (2014) DOI10.1299, SMM0357.

(3) Kenji KANEKO and Keitaro HIGAKI, Delamination Strength of WC-Co Thermal-Sprayed Coating Under Combined Stresses by Torsion-Tension Pin-Test Method, Journal of Thermal Spray Technology: Volume 23, Issue 6 (2014), pp. 903-909

[学会発表](計 16件)

(1) 金子堅司, 三輪真吾; 「遮熱被膜のそぎ落としせん断試験による付着強度評価に関する研究」, 日本材料学会第 60 期学術講演会講演論文集, USB メモリー(2011-5), 大阪大学

(2) Kenji Kaneko : Adhesive Strength Evaluation of Thermal Sprayed Coating by Torsion Pin-test Method, Proceedings of the 4th JSME/ASME 2011 International Conference on Material and Processing(ICM&P 2011) June 13-17, 2011, Corvallis, Oregon, USA

(3) 金子堅司, 檜垣圭太郎, 野澤利恵: 「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 2011 年度年次大会講演論文集, CD-ROM, No.11-1 (2011-9) 東京工業大学

(4) 金子堅司, ノルアティラ: 「炭素繊維強化生分解性プラスチックの弾性係数の押込み試験法による評価」, 日本機械学会 2011 年度年次大会講演論文集, CD-ROM, No.11-1 (2011-9) 東京工業大学

(5) 金子堅司, 水島亜紗美: 「微小押し込み試験によるポリプロピレンの非弾性応力ひずみ関係の決定」, 日本機械学会 2011 年度計算力学部門講演会, CMD2011, CD-ROM 講演番号 1010, (2011-10) 岡山大学

(6) 金子堅司: 「押し込み試験によるポリプロピレンの非弾性変形特性の決定」, 日本学術会議 2012 年度第 61 回理論応用力学講演会, USB メモリー, (2012-3) 東京大学

(7) 金子堅司, 檜垣圭太郎, 林 鴻希: 「ねじりピンテスト法による WC-Co 溶射被膜の付着疲労強度評価」, 日本材料学会第 61 期学術講演会講演論文集, USB メモリー(2012-5), 岡山大学

(8) Kenji Kaneko & Keitaro HIGAKI : Delamination Strength Evaluation of Thermal Sprayed Coating by Torsion

Pin-test Method, Proceedings of the 3rd Asian Symposium on Materials and Processing (ASMP2012) August 30-31, 2012, Chennai, India

(9) 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&M2012(材料力学カンファレンス)講演論文集, CD-ROM, (2012-9) 愛媛大学

(10) 金子堅司, 三輪真吾, 松崎拓也: 「そぎ落としせん断試験による WC-Co 溶射被膜の付着強度評価」, 日本機械学会 M&M2012(材料力学カンファレンス)講演論文集, CD-ROM, (2012-9) 愛媛大学

(11) Kenji KANEKO, Keitaro HIGAKI and Koki HAYASHI: Delamination Fatigue Strength Evaluation of Thermal Sprayed Coating by Torsion Pin-test Method, Proceeding of the 5th Asian Thermal Spray Conference (ATSC 2012) (2012-11) Tsukuba International Congress Center, Ibaraki, Japan

(12) 金子堅司, 檜垣圭太郎: 「ねじりピンテスト法による溶射被膜の剥離強度評価に関する研究」, 日本機械学会 第 20 回機械材料・材料加工技術講演会(M&P2012)講演論文集, CD-ROM, (2012-12) 大阪工業大学

(13) 金子堅司, 岩崎剛, 三輪真吾: 「WC-12Co 溶射被膜のせん断剥離強度の実験的検討」, 日本機械学会 2013 年度年次大会講演論文集, CD-ROM, No.13-1 (2013-9) 岡山大学

(14) 金子堅司, 三輪真吾: 「WC-12Co 溶射被膜のせん断剥離強度の解析的検討」, 日本機械学会 2013 年度年次大会講演論文集, CD-ROM, No.13-1 (2013-9) 岡山大学

(15) 金子堅司, 田沼遊太郎: 「ねじりピンテスト法による遮熱被膜の付着強度評価」, 日本機械学会 M&M2013(材料力学カンファレンス)講演論文集, CD-ROM, (2013-10) 岐阜大学

(16) 金子堅司, 新藤大輔: 「微小押し込み試験によるポリプロピレン及び窒化アルミ複合高分子の非弾性応力ひずみ関係の決定」, 日本機械学会 2013 年度計算力学部門講演会, CMD2013, CD-ROM (2013-11) 佐賀大学

[図書](計 1件)

日本材料学会編「界面強度評価ハンドブック」p.90-92, p.158-166. 担当(2011.1)

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・教授)

研究者番号: 40016803