

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

題目(和文)	遮熱コーティングの剥離耐久性に及ぼす残留応力の影響に関する研究
Title(English)	
著者(和文)	岡嶋芳史
Author(English)	Yoshifumi Okajima
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第10633号, 授与年月日:2017年9月20日, 学位の種別:課程博士, 審査員:阪口 基己,中村 春夫,井上 裕嗣,岸本 喜久雄,轟 章
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第10633号, Conferred date:2017/9/20, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	論文要旨
Type(English)	Summary

## 論文要旨

THESIS SUMMARY

専攻： Department of	機械制御システム	専攻	申請学位 (専攻分野)： 博士 Academic Degree Requested	博士 (工学)
学生氏名： Student's Name	岡嶋 芳史		指導教員 (主)： Academic Advisor(main)	阪口 基己
			指導教員 (副)： Academic Advisor(sub)	井上 裕嗣

### 要旨 (和文 2000 字程度)

Thesis Summary (approx.2000 Japanese Characters )

近年の温室効果ガス削減の潮流から、ガスタービン発電の効率向上に対する期待が高まっている。効率向上のためにはタービン入口温度の上昇が必要であり、現在の最高温度は 1,600°C に到達している。このような高温環境下での運転に耐えるため、耐熱合金の表面を熱伝導率の低い遮熱コーティング (TBC) で保護することで金属表面温度を低減する技術が発展し、最近では特にその重要性は高まる一方である。しかし、TBC は線膨張係数の低いセラミックスを高い金属表面に施工するため、その線膨張係数の違いから常に剥離のリスクが付きまとう。そのため、剥離耐久性に関する研究が長年にわたって実施されてきたものの、溶射プロセスと損傷モードが複雑であるために力学的な取扱いが困難であり、特に、溶射プロセスで生じる皮膜内応力と界面剥離強度との関連性については依然として不明な点が多い。

本研究では、剥離しにくい TBC を成膜するための実用的指針を得ることを目的とし、界面破壊靱性値を評価パラメータとして皮膜内応力が及ぼす影響を実験的・解析的に検証した。さらに、皮膜内応力が組織に及ぼす影響についても検討し、間接的に界面破壊靱性値に及ぼす影響についても考察した。

第 1 章「序論」では、TBC 溶射プロセスと皮膜の剥離に対する力学的な評価に関するこれまでの研究を概説することで現在の課題を明らかにし、本研究で取り組んだアプローチについて述べた。

第 2 章「溶射中の応力発達メカニズムとろうの滴下による検証実験」では、まず過去の研究で推定されている溶射皮膜内の応力発達メカニズムを説明した。すなわち、溶射皮膜内応力には、単一溶射スプラットが急冷凝固する際に生じる「急冷応力」、皮膜 1 層が成膜される際に生じる「進展応力」、皮膜全体が成膜される際に生じる「堆積応力」、皮膜全体が冷却される過程で基材との熱伸び差で生じる「熱応力」、最終的に皮膜に残留する堆積応力と熱応力の和である「残留応力」、の 5 つを定義した。これらの応力発達メカニズムを検証するため、取扱いの容易なるろうの滴下による実験を行った。その結果、ろうの滴下によって溶射中に生じる急冷応力の再現に成功し、これまで推定されていた応力発達メカニズムの妥当性を確認した。また、急冷応力が高いと、その引張応力によってろうに縦割れが多く生じることを明らかにした。

第 3 章「TBC の界面破壊靱性に及ぼす粒子熔融状態の影響」では、第 2 章の応力発達メカニズムに立脚した溶射時反り変形計測技術を用いて、TBC の溶射パラメータを変化させたときの粒子状態量と各種皮膜内応力を計測した。また、溶射後の試験片の界面破壊靱性値を計測し、粒子熔融状態が皮膜内応力、ヤング率ならびに界面破壊靱性値に与える影響を系統的に検討した。その結果、粒子がよく融けている状態では皮膜が緻密になり発生する堆積応力は高まるとともに界面破壊靱性値も上昇することを明らかにした。

第 4 章「TBC の界面破壊靱性に及ぼす残留応力の影響」では、溶射パラメータを固定したまま、基材と皮膜の厚さを変えることで皮膜内残留応力を意図的に変化させ、溶射時反り変形計測によってこの残留応力を定量化するとともに界面破壊靱性値との相関を検討した。また、引張による界面破壊靱性試験を対象にして有限要素解析を行い、皮膜のヤング率・厚さ・応力・界面き裂の接触考慮有無・接触面の摩擦・接着層の有無、といった因子が界面破壊靱性値に及ぼす影響を検証した。実験・解析の両面から、圧縮の残留応力が大きくなるにつれて界面破壊靱性値は低下する傾向にあることを明らかにした。その結果、皮膜の残留応力を抑制することで TBC の剥離耐久性を上げられることを結論付けた。

第 5 章「実機における TBC の剥離防止対策」では、剥離しにくい TBC を成膜するための実用的指針について、第 4 章で得られた結果に基づき溶射時の皮膜内応力を制御する案と、第 2 章で得られた結果を基に大きな堆積応力を作用させて皮膜組織に縦割れを導入する案を検討した。前者については、皮膜の残留応力を抑制するために過度な熱応力が生じないように基材温度を適切に管理すること、後者については、溶射出力を高めて粒子の熔融状態を高めて大きな堆積応力を発生させ、これによってひずみ緩和能のある縦割れ皮膜とすることが有効であることを示した。

第 6 章「結論」では、各章で得られた結果を総括し、今後の課題を示した。

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note：Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1 copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ (T2R2) にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).

(博士課程)  
Doctoral Program

## 論文要旨

THESIS SUMMARY

専攻 : Department of	機械制御システム	専攻	申請学位 (専攻分野) : Academic Degree Requested	博士 (工学)	Doctor of
学生氏名 : Student's Name	岡嶋 芳史		指導教員 (主) : Academic Advisor(main)	阪口 基己	
			指導教員 (副) : Academic Advisor(sub)	井上 裕嗣	

要旨 (英文 300 語程度)

Thesis Summary (approx.300 English Words)

Thermal Barrier Coatings (TBCs) are widely applied in industrial gas turbine to protect hot parts from combustion gas. Since spallation of the TBCs is crucial problem, better adhesion between substrates and TBCs has been required. The purpose of this study is to propose practical ideas to improve adhesion strength of TBCs from a perspective of the effects from internal stress of TBCs induced by spraying process on interfacial fracture toughness.

First, past studies for mechanism of internal stresses induced by spraying process were surveyed and paraffin droplet tests were performed to model the spraying process and confirm the mechanism. Vertical cracks were observed in the solidified paraffin with high quenching stresses.

Second, based on the mechanism of internal stresses, in-situ curvature monitoring method was conducted to measure deposition stresses which evolve during deposition process for TBC top-coat sprayed by various parameters. Simultaneously, the modified tensile test and the interfacial indentation test were conducted to evaluate the interfacial fracture toughness. As the results, well-molten particles made dense coatings which cause higher deposition stresses and higher interfacial fracture toughness.

The effects of residual stresses on the fracture toughness were also investigated. Various TBCs were produced by changing the thickness of coating and substrate using the same spraying parameters. Residual stresses were measured by in-situ curvature monitoring method and interfacial fracture toughness was measured by the tensile and indentation methods. Additionally, the tensile test was analyzed by finite element method to evaluate the effects of several influential factors on the fracture toughness. It was concluded that higher compressive residual stress decreases interfacial fracture toughness.

Based on the experimental and analytical findings, practical ideas to improve interfacial fracture toughness were proposed as followed; (1) Plasma output should be increased to provide well-molten coating powders, (2) substrate temperature should be kept under 200-300°C to control the compressive residual stress, (3) coating microstructure should involve vertical cracks which lead to tolerant coating for thermal strain.

備考 : 論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note : Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1copy of 800 Words (English).

注意 : 論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。  
Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).