遮熱コーティングの機械的特性評価法の標準化に向けて 一切出し法による溶射 TBC 皮膜の残留応力測定

Activities toward Standardization for evaluating mechanical properties of thermal barrier coatings
-Measurement of residual stress by stress-relief method-

●学 刑部真和・長岡技大大学院
Masakazu OSAKABE,
Nagaoka University of Technology
正 原田良夫・トーカロ (株)
Yoshio HARADA, TOCALO Co., Ltd.

正 山岸郷志・長岡技大
Satoshi YAMAGISHI,
Nagaoka University of Technology
正 川崎 亮・東北大学大学院
Ryo KAWASAKI, Tohoku University

正 岡崎正和・長岡技大
Masakazu OKAZAKI,
Nagaoka University of Technology

Key Words: Thermal Barrier Coatings, Residual stress, APS, YSZ, Bond coating, Stress-relief method

本研究では、大気プラズマ溶射法によって製作した遮熱コーティング試験片の残留応力について、組合せはりの理論を適用し、応力解放法により測定した。一連の測定結果を紹介するとともに、この手法により残留応力を測定する際の今後の課題についても検討した。

1. 緒言

近年の低炭素社会実現に向けた世界的な取り組みの中で、エネルギー機器の高効率化は最も重要な課題のひとつである。ガスタービン機関においては、その高温部材の表面に TBCs を施し運転温度の上昇をはかることで熱効率向上の努力がなされてきた^{1),2)}。一般に、TBCs 中には成膜時の残留応力が存在しており、この残留応力を精度良く測定することは皮膜設計において非常に重要である^{3),4)}。

本研究では、TBCs の各種機械的特性評価法の標準化に向けた取り組みの一環として、TBCs の残留応力を切出し法（応力解放法）により測定した。さらに、この手法による測定の際に配慮すべき因子と今後の課題について検討した。

2. 測定原理

TBC 試験片は、初期残留応力が自己平衡を保っている複合構造体と考えることができる (Fig. 1(a))。そこでは、皮膜および基材中に、大きさは等しいが符号の異なる内力 (P あるいは -P) が存在し、これら是一对の偶力をなして試験片内に内在している。いま、皮膜を逐次除去していくと、P は P' に変化し、それにともない偶力も変化するため、TBC 試験片の初期形状も変化する。この変化量を測定し、それにより初期残留応力を推定するのが本研究の基本原理である。

Fig. 1 Residual stress analysis model

具体的には、皮膜の厚さを初期厚さ t_c から Δt_c だけ除去して限りなく 0 に近づけていくと (Fig. 1(a) → 1(b))、応力解放に伴う変形により基材底面部のひずみは $\Delta \varepsilon_{s_b} (= \varepsilon'_{s_b} - \varepsilon_{s_b})$ だけ変化する。組合せ梁 (はり) 理論⁵⁾を適用すると、 $\Delta \varepsilon_{s_b}$ は初期の内力 P および皮膜除去量 Δt_c ($\approx t_c$) とつぎのように関係づけられる。

$$P = \frac{-\Delta \varepsilon_{s_b}}{\left(\frac{(-1)}{E_s A_s} + \frac{(\Delta t_c + t_s) y_{s_b}}{2(E_s I_s + E_c I_c)} \right)} \quad (1)$$

ここで

E_s : 基材の弾性係数

E_c : コーティングの弾性係数

I_s : 組合せ梁の中立軸に対する基材の断面二次モーメント

I_c : 組合せ梁の中立軸に対するコーティングの断面二次モーメント

t_s : 基材の厚さ

y_{s_b} : 組合せ梁の中立軸から基材表面までの距離

Δt_c : 皮膜除去量 Δt_c ($\approx t_c$)

式 (1) を適用すれば $\Delta \varepsilon_{s_b}$ の計測から P、さらには初期残留応力分布も推定される。

3. 実験方法

3-1 供試材

本研究では、2 種類の表面処理した平板状コーティング試験片を準備した。一つ目は、プラストしたステンレス鋼基材上に CoNiCrAlY ボンドコート成膜したボンドコート試験片 (以下 BC 試験片) であり、もう一方は BC 試験片の表面にさらに 8wt.% YSZ トップコート成膜した TBC 試験片である。成膜は何れも大気溶射法によった。用いた試験片の寸法は $45 \times 10 \times t$ [mm] (厚さ t は試験片ごとに異なる) の積層はり状の試験片である。試験片の各層の厚さを Table 1 に示す。

Table 1 Thickness of individual layer (mm)

Specimen	Substrate	BC	Specimen	Substrate	BC	Topcoat
BC2-3	2	0.3	TBC2-3	2	0.1	0.3
BC2-5	2	0.5	TBC3-3	3		0.3
BC3-3	3	0.3	TBC4-3	4		0.3
BC4-3	4	0.3				

3-2 残留応力測定

応力解放法による残留応力測定の際の皮膜の除去は、機械的研削法により行った。トップコート層の除去にはダイヤモンド砥石を、ボンドコート層の除去にはアルミナコランダム砥石を使用した。皮膜除去中における試験片のひずみの変化

は、試験片底面の中央部、長手方向に貼付けたひずみゲージにより連続的に測定した (Fig. 1)。一連の測定の際には以下の段階を目安として設定した (これは、全ての試験片が多かれ少なかれ初期曲率を持っていたため、皮膜を界面に平行に、かつ、一様に除去することが困難であったためである)。

[BC 試験片の場合]

Stage 1 : 試験片表面に砥石が接触してからボンドコートの厚さ分だけ研削した段階、

Stage 2 : ボンドコートが完全に除去された段階

[TBC 試験片の場合]

Stage I : 試験片表面に砥石が接触してからトップコートの厚さ分だけ研削した段階、もしくは、ボンドコート層が露出した段階のいずれか早い方、

Stage II : トップコートが完全に除去された状態 (試験片初期反りのため一部のボンドコートが研削される場合もある)

Stage III : トップコート下のボンドコートが完全に除去された状態

4. 結果および考察

4-1 BC 試験片の残留応力の測定結果

BC 試験片の測定結果の概略を Table 2 に総括した。一連の測定によって推定された BC 試験片中の初期残留応力分布の推定結果の代表例を Fig. 2 に示す。なお、計算に際しては Table 3 に示す各材料の弾性係数を用いた。これらより、いずれの試験片においても、ボンドコート表面の残留応力は引張であり、その大きさは、ボンドコートの厚さが相対的に大きくなるにつれて増加するようである。これら一連の傾向は、溶射行程中の残留応力を測定した和田らの測定結果と同様である (本報と同時に公表予定)。なお、Fig. 2 において、式

(1) 中の $\Delta \varepsilon_{s,b}$ の測定段階の影響に注目すると、Stage 1 の方が大きめの初期残留応力を与えるようである。

Table 2 $\Delta \varepsilon_{s,b}$ measured at each stage ($\times 10^{-6}$)

	Stage 1	Stage 2
BC2-3	-95.2	-85.7
BC2-5	-242	-81.0
BC3-3	-87.6	0
BC4-3	-79.0	-11.4

Table 3 Elastic modulus (GPa)

Substrate (Stainless steel)	200
CoNiCrAlY bond coat	140
8wt%-YSZ top coat	28

4-2 TBC 試験片の残留応力の予測

ここでは、最初に、トップコートのみを除去した際に生ずる $\Delta \varepsilon_{s,b}$ の測定結果からトップコートの残留応力を計算した。その際、基材とボンドコートは一つの複合基材系として近似した。その複合基材系の弾性係数は

$$E_{bs} = \frac{E_b t_b + E_s t_s}{t_b + t_s} \quad (2)$$

により近似した。TBC 試験片全体の初期残留応力分布は、それらの結果に 4-1 節の BC 試験片の結果を重合わせて類推した。得られた結果を Fig. 3 に示す。これより、トップコート内では引張残留応力が生じているが、その大きさはかなり小さい。一方、ボンドコート内では比較的高いレベルの引張残留応力が生じている。これら一連の傾向も、溶射行程中の残留応力を測定した和田らの測定結果と同様である (本報と同時に公表予定)。

Fig. 2 Distribution of residual stress in BC4-3 specimen

Fig. 3 Distribution of residual stress in TBC2-3 specimen

4-3 今後の課題

以下の点が今後検討すべき項目としてあげられよう。

- 1) 皮膜除去過程において、皮膜と基材は常時一体変形している (はく離が無い) と仮定したが、この仮定の妥当性の検証と検討
- 2) $\Delta \varepsilon_{s,b}$ の測定から初期残留応力を類推する際、どの除去段階 (Stage I, II など) での計測値を用いるのが適当で誤差が少ないかの検討
- 3) TBC 試験片の初期残留応力を求める際の重合せ法の妥当性の検証と検討
- 4) 皮膜除去方法の最適化。本研究のような研削法による場合、除去の際に用いる試験片固定ジグによる拘束によって生ずる見かけ上のひずみの最小化
- 5) 残留応力計算の際に用いる皮膜物性値の値
- 6) 初期曲率を持つ試験片に対する測定の際、皮膜は一様に除去できないことが多いが、それによる影響の検討と最小化

5. 結言

省略

謝辞

本研究は、(財) 大阪科学技術センター附属ニューマテリアルセンターが、(独) 新エネルギー・産業技術総合研究開発機構から委託を受けて実施した「耐熱コーティング特性評価試験方法の標準化調査研究」の成果の一部を報告するものである。

参考文献

- 1) R.A. Miller, *J. Am. Cer. Soc.* 67(1984) 517-527.
- 2) D.Schwingel et.al., *Surf. and Coat. Tech.*, 108-109(1998) 99-106
- 3) J.Matejcek, S.Sampath, *Acta Materialia* 51 (2003) 873-885
- 4) V.Teixeira, M.Andritschky, W.Fischer, H.P.Buchkremer, D.Stove, *Surf. and Coat. Tech.*, 120-121 (1999) 103-111
- 5) S.Timoshenko "Strength of Materials", chap.7, Van Nostrand Reinhold Co., (1955)