高エネルギー放射光を用いたひずみスキャンニング法による TBC の残留応力測定

Measurement of residual stress in thermal barrier coatings by the strain scanning method
using high-energy X-rays from synchrotron source

○学 町屋修太郎 (名古屋大) 正 秋庭 義明 (名古屋大)
正 田中 啓介 (名古屋大) 正 鈴木 賢治 (新潟大)

Shutaro MACHIYA, Graduate School, Nagoya University, Chikusa-ku, Nagoya 464-8603, Japan
Yoshiaki AKINIWA, Nagoya University
Keisuke TANAKA, Nagoya University
Kenji SUZUKI, Niigata University, 8050, Igarashi 2no-cho, Niigata 950-2181, Japan

Key words: X-Ray stress measurement, Residual stress, Synchrotron, Ceramics, Thermal barrier coating

1. 緒 言

ガスタービンで広く用いられている遮熱コーティングの強度評価のためには、コーティング層内の応力分布を評価することが不可欠であり、これまで X 線法による測定が試みられている。これまでの測定方法である $\sin^2\psi$ 法は、精度が高い反面、研磨など測定に長時間を要する問題点があったのに対し、ひずみスキャンニング法は、原理が単純で短時間に応力分布を求められる。この方法は、高エネルギー X 線を試料に入射、侵入させ、その回折を入射および受光側のスリットで作られた光路体積からその平均ひずみを測定する。試験片を研磨することなく非破壊的かつ迅速にひずみ分布を測定できる。本報告では、高エネルギー高輝度 X 線を利用して、遮熱コーティング (TBC) において非破壊的なひずみ分布の測定を試みた。また、本方法は、表面効果により回折角度がシフトする問題があり、この解決案として S45C 材においてアナライザーを適用した実験を行い改善の可能性を検討した。

2. 実験方法

2・1 材料および試験片 試験片を図 1 に示す。直径 30mm の円板状試験片である。Ni 基超合金 (IN738LC) の基材の上にボンドコートとして CoNiCrAlY を減圧プラズマ溶射し、さらにトップコートとして 8mass%Y₂O₃-ZrO₂ を大気プラズマ溶射した。各コート厚さは、ボンドコート 0.1 mm、トップコート 0.5 mm である。試験片は、溶射したままの試験片 (as-sprayed) およびトップコート面に 1773K と常温の 500 回の熱サイクルを与えた試験片 (500 cycles) の二種類である。また、無ひずみ材として、S45C アニール材を準備した。

2・2 ひずみスキャンニング法 試験片のコート面を基準に、面内の応力を σ_1 , σ_2 , 法線方向の応力を σ_3 とし、ひずみも同

Fig. 1. Test specimen.

Table I Conditions for stress measurement.

Beam line	BL02B1
Wavelength	17.404 pm (72.769 keV)
Divergent slit (mm)	0.4 × 2 (height × width)
Receiving slit 1, 2 (mm)	0.4 × 5 (height × width)
Divergent angle of RS	0.7056 deg
Diffraction	511+115+333
Diffraction angle 2θ	10.067 deg
X-ray Young's modulus	143 GPa
X-ray Poisson's ratio	0.267

様に考えると、3 軸応力の関係は次式で与える。

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{E} [\sigma_1 - \nu(\sigma_2 + \sigma_3)]$$

Fig. 2. Configuration of gauge volumes.

Fig. 3. Error angle of surface effect.

Fig. 4. Diffraction angle by scanning method.

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{E}[\sigma_2 - \nu(\sigma_1 + \sigma_3)] \quad (1)$$

$$\varepsilon_3 = \frac{1}{E}[\sigma_3 - \nu(\sigma_1 + \sigma_2)]$$

トップコート表面の残留応力をラボX線により測定した結果溶射ままの試験片および熱サイクル負荷した試験片は等二軸応力であった。ここで、 $\sigma_1 = \sigma_2$ とすると $\varepsilon_1 = \varepsilon_2$ となり、

$$\sigma_1 = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)}(\varepsilon_1 + \nu\varepsilon_3) \quad (2)$$

$$\sigma_3 = \frac{2\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)}(\varepsilon_1 + \frac{1-\nu}{2\nu}\varepsilon_3) \quad (3)$$

一方、格子面間隔 d とひずみ ε の関係は

$$\varepsilon = \frac{d - d_0}{d_0} \quad (4)$$

であり、 d_0 は無ひずみの格子面間隔である。格子面間隔 d と回折角 θ は、ブラッグの回折条件 $\lambda = 2d \sin \theta$ で与えられる。

2・3 光学系および放射光条件 放射光は、(財)高輝度光科学研究センターのシンクロトン放射光施設のビームライン BL02B1 を利用した。ひずみスキャン法により測定する場合、ゲージ体積が問題となる。発散スリットの高さを t_d とし、受光スリット RS1 と RS2 の高さを t_r としたときのゲージ体積を図 2 に示す。ゲージ体積を 2 分するトップコート表面を $z = 0$ とし、反射法においては深さ方向に z 軸ステージを移動してひずみスキャンを行った。 z 位置として 0 から 0.26 mm まで 20 μ m ステップで移動し、14 点のひずみ測定を行った。透過法による測定の場合は、試験片を試料台に垂直に立て x 軸ステージを入射ビーム側に移動させてひずみスキャンを行った。 x 位置として 0 から 0.25 mm まで 50 μ m ステップで移動し、6 点のひずみ測定を行った。放射光条件を表 1 に示す。ピーク位置は 4/5 価幅法を用いて決定した。また、反射法の場合、図 3 のように試料の位置が徐々に上昇していくが、 $L = 1250$ mm、ダブルスリット間距離を 650 mm、スリット幅 0.4 mm の条件では受光側から見てゲージ体積は、まったくコリメーションされていない。図 3 の光学中心に対して、ゲージ体積の中心が s だけずれるため、角度誤差 θ_e が生じる問題がある。

3. 実験結果および考察

3・1 透過法および反射法による測定結果 ひずみスキャン法の測定結果を図 4 に示す。ひずみ算出のための基準値 d_0 は透過法 ($z = 0$) で得られた回折角より求めた値を採用した。この d_0 を用いてひずみを計算し、さらにひずみから、応力を計算するために、深さとひずみの関係を多項式で近似し、式 (2)、(3) を用いて応力に換算した結果を図 5 に示す。 σ_1 、

Fig. 5. Stress distribution.

Fig. 6. Dependence of diffraction angle on slit optics.

σ_3 とともに、表面で大きな引張り応力が深さ方向に減少する。また、熱サイクルを負荷した方が応力はやや小さく、応力緩和がうかがえる。ただし、図 3 に示すように、反射法のゲージ体積の中心がコーティング表面から深さ $z = 0.2$ mm に位置する所で完全にゲージ体積の中心が光軸中心と一致する。反射法では完全にゲージ体積がコーティング面を含むまでは、測定される回折角に表面の影響があり、ひずみ ε_3 が大きく測定される。この表面効果を抑えるためには受光側にアナライザーを設置することが考えられる。アナライザーの効果を明らかにするために、S45C の焼鈍材、Fe(211) を用いて、通常のダブルスリットと結晶性の強い順に Ge(111)、LiF(200)、Cu(111) の各種アナライザーを併用した測定を行い比較した結果を図 6 に示す。図中の実線は表面効果によるピークシフト θ_e を計算により求めた結果であり、ダブルスリットのみとの結果と比較すると、傾向は一致するものの、実測値の方が回折角のシフトはやや大きくなり、 θ_e 以外の他の影響も含んでいるものと考えられる。今回のスリット高さが 0.2 mm であるので、 z が 0.1 mm より深くなるとゲージ体積全体が表面下に完全に沈むため回折角は移動しなくなる。LiF および Ge アナライザで測定した場合、回折角は z にかかわらずほぼ一定の値となり、コリメーション効果の極めて高いアナライザを併用することは、表面効果除去に有効である。TBC のように無ひずみ材が得られない材料についても、アナライザにより回折角が表面の影響を受けないと仮定して、より正確な残留応力を求められる可能性がある。なお本研究は、(財)高輝度放射光施設の SPring-8 のマシンスタディーおよび課題番号 2003B0161-NMD1-np, 2003B0217-NM-np において行ったものである。

結言および参考文献 省略