

熱疲労強度に基づいた溶射多層部材の溶射条件の最適化

山崎 泰広*, 遠藤 賢洋**, 井筒 進***

(平成 20 年 10 月 31 日受理)

Optimization of Spray Conditions in a Multilayered Coating System Based on Thermal Fatigue Strength

Yasuhiro YAMAZAKI*, Yoshihiro ENDOH** and Susumu IZUTU***

Taking advantage of the industrial and university collaboration symposium which was held in Niigata city in 2005, this project has been started. In this project, the optimization of the spray process in the multilayered coating system was investigated based on the thermal fatigue strength. In addition, the stress condition near the interface of the coating was discussed. Based on the experimental and analytical investigations, the condition of the coating process was optimized.

Key words: Multilayered coating, Thermal fatigue damage, Bond coating, Optimization, Adhesion strength

1. はじめに

1.1 産学共同による本研究のきっかけ

本研究は、新潟工科大学産学交流会・会員企業である新潟メタリコン工業(株)との共同研究として開始したプロジェクトであり、平成 19 年度学内共同研究費の補助を受けて遂行された。その始まりは、平成 18 年 2 月に新潟市で開催された本学主催の産学交流会で筆頭著者のポスタープレゼンテーションに新潟メタリコン工業(株)井筒社長が興味をお持ちいただいたのがきっかけである。後日、改めて互いの情報を交換しあい、問題意識を共有しその解決に向けて本研究がスタートした。本学主催産学交流事業に発し、かつ、本学の研究費助成を受けて行った本研究は、産学交流の成功事例の一つと考えられる。

1.2 溶射とは

溶射とは、コーティングプロセスの一つであり、耐環境、耐食、硬質、機能性など各種コーティングの施工法として広く使用されている。一般に溶射では、Fig.1 に模擬的に示すように、溶射装置により高速・高温に加速・加熱された溶射材料が溶融または半溶融状

* 機械制御システム工学科 准教授(Department of Mechanical and Control Engineering, Associate Professor)

** 機械制御システム工学科 (現:新潟メタリコン工業(株)) (Department of Mechanical and Control Engineering, currently, Niigata Metaricon Co.Ltd.)

***新潟メタリコン工業(株) 開発営業部部長(Niigata Metalicon Co.Ltd., Manager)

態で被溶射材の表面に衝突し、扁平した粒子が堆積することにより皮膜が形成される。溶射粒子の密着部には、機械的に結合した部分、局部的に熔融結合した部分、酸化膜などを挟んで密着している部分などがあり、衝突により扁平した粒子の間に熔融が完全でなかった粒子が介在している場合もある。従って、溶射皮膜では冶金的に製造された通常材料とは結晶組織が異なり、その機械的特性も大きく異なる場合が多い。溶射材料としては、金属材料やセラミックスなど多様な材料が使用でき、また、種々の被溶射材にも適用可能で、金属、セラミックスはもちろん、プラスチックや紙にも施工が可能である。

1.3 本研究の背景と目的

近年オール電化住宅の増加に伴い電磁調理器が普及してきている。一方、アルミニウム合金を使った調理器具は現在広く使用されている調理器具であるが、そのままでは電磁調理器具としては使用出来ない。そこで、アルミニウム合金基材に鉄系の皮膜を溶射した調理器具が開発され、普及してきている。しかし、一般に鉄系の皮膜とアルミニウム合金の間には熱膨張係数のミスマッチが不可避であり、そのため、これらの調理器具では空焼きや繰り返し使用による熱サイクルに起因した皮膜のはく離が問題となっている。

そこで本研究では、溶射調理器具の長寿命化と溶射プロセスの最適化を目指し、Al 合金を基材として鉄系皮膜を溶射したコーティング材（以下、Fe 溶射 Al 合金と呼ぶ）を対象として熱サイクル試験を行い、JIS H8402 に準拠して残存密着強度を評価した。そして、熱サイクルを付与した Fe 溶射 Al 合金の残存密着強度を指標として、熱疲労強度に及ぼすボンドコートプロセスの影響について検討した。併せて、解析的に皮膜端部の応力特異性を検討し、端部形状の最適化を試みた。

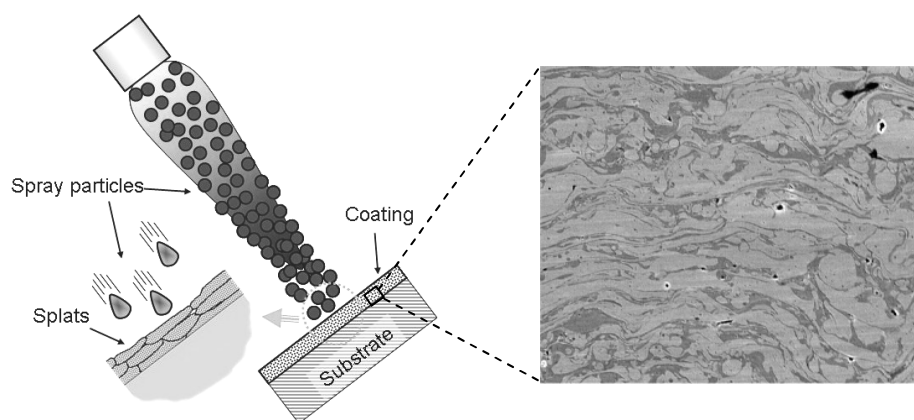


Fig.1 Schematic illustration of the thermal spray process and the typical microstructure of the coating sprayed.

2. 熱サイクル疲労強度とそれに及ぼす施工プロセスの影響

2.1 供試材と試験片形状

供試材は、厚さ 9mm の鋳造 Al 合金 AC4A 基材に、NiAl をボンドコートとして溶射し、トップコートとして Fe 合金を溶射した Fe 溶射 Al 合金である。ここでトップコートの厚さは 700 μm とし、ボンドコートの厚さは 50 μm と 200 μm の 2 種類の供試材を準備した。また、

基材表面をブラスト処理した後, 基材を予加熱しながら直接 Fe 合金を溶射した材料も用意した (ボンドコート無し). それぞれ, NiAl150 材, NiAl200 材, 予加熱材と記述する. これらの供試材からワイヤー放電加工機を用いて $\phi 20$ の円筒状に切り出し, 試験片とした.

2.2 熱サイクル試験方法

熱サイクル試験は, 実際の電磁調理器による加熱状態を模擬するため高周波加熱方式とした. 高周波加熱式熱サイクル試験装置の模擬図を Fig. 2 に示す. 実験中, 高周波誘導加熱装置の出力を一定に制御した状態で, エアシリンダにより試験片を誘導コイル内に入れさせることで熱サイクルを付与した. 試験片の温度は試験片表面にスポット溶接で取り付けられた熱電対により測定し, この試験片温度に応じて制御用コンピュータにてエアシリンダを制御した. なお, 冷却時はファンによってエアーを吹き付け強制的に冷却した. 試験条件は, 最低温度 50°C , 最高温度 320°C の熱サイクルとし, 所定の回数付与した後, 残存密着強度を評価した.

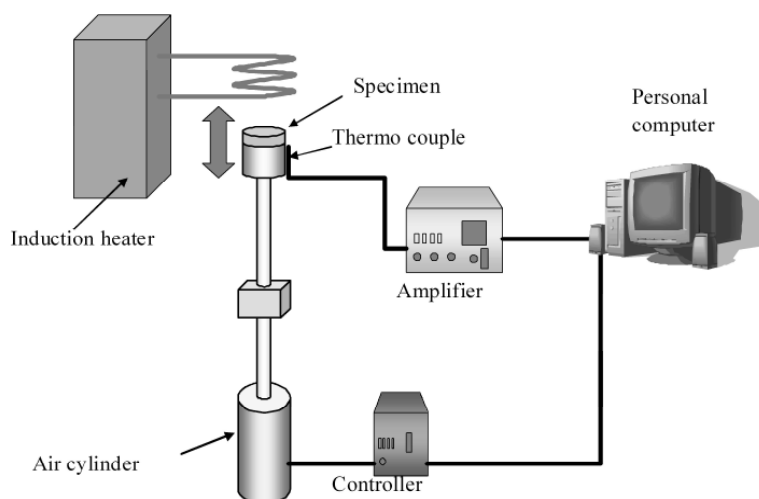


Fig.2 Schematic illustration of the thermal cycle fatigue test system.

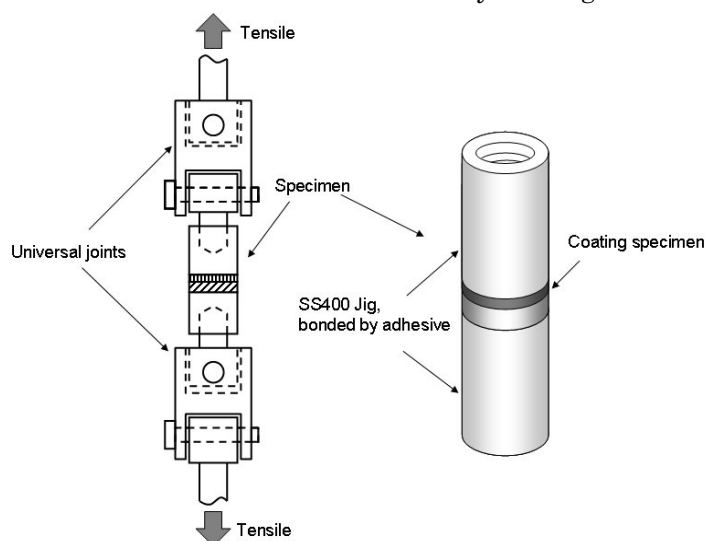


Fig.3 Schematic illustration of the residual adhesion strength test.

2.3 残存密着強度評価法

残存密着強度は、日本工業規格(JIS)で規格化されているセラミック溶射皮膜試験法 JIS H8402 に準拠して評価した。密着強度試験の模擬図を Fig.3 に示す。本研究では所定の熱サイクルを付与したコーティング試験片を Fig.3 のように $\phi 20 \times L40$ の SS400 丸棒に熱硬化型接着剤アラルダイト AT1 で接着して密着強度試験片とした。

2.4 残存密着強度試験結果

本研究では、熱サイクル後の残存密着強度を引張試験中の最大荷重をコーティング断面積で除した値で定義した。残存密着強度と熱サイクル数の関係を Fig.4 に示す。図中の矢印は接着剤破断した試験片を示している。Fig.4 より、いずれのコーティング材においても熱サイクル数の増加とともに残存密着強度が低下しており、その低下挙動は、予加熱材にくらべ NiAl50 材と NiAl200 材が顕著である。さらに、ボンドコート厚さの影響に注目すると、ボンドコート厚さの増加に伴い密着強度が増加している。これら、熱サイクルに伴い残存密着強度が低下した試験片においては、熱サイクル付与後に界面き裂が発生していた。密着強度試験後の破面よりき裂寸法を測定した結果、熱サイクルによる残存密着強度の低下には界面き裂の発生と進展が関連していた。従って、熱疲労強度を向上するためには、界面疲労き裂の発生・進展を抑制することが重要である。

界面疲労き裂の発生・進展挙動とその駆動力を考察した結果、Fe 溶射 Al 合金の熱疲労強度向上に対して、以下のような最適施工プロセスの指標を得た。

- 界面に生じる熱応力を低減させるため、トップコート溶射プロセスパラメータを変化させて皮膜を多孔質化あるいは縦割分割化を図るようなプロセスを選択する。
- 熱サイクル中の熱応力を緩和するためボンドコートのある程度厚膜化する。
- 施工後に生じる残留応力を低減させるため、溶射施工時に基材に予加熱を与える。

なお、実験結果および考察の詳細については、後日、学会誌等で改めて報告する予定である。

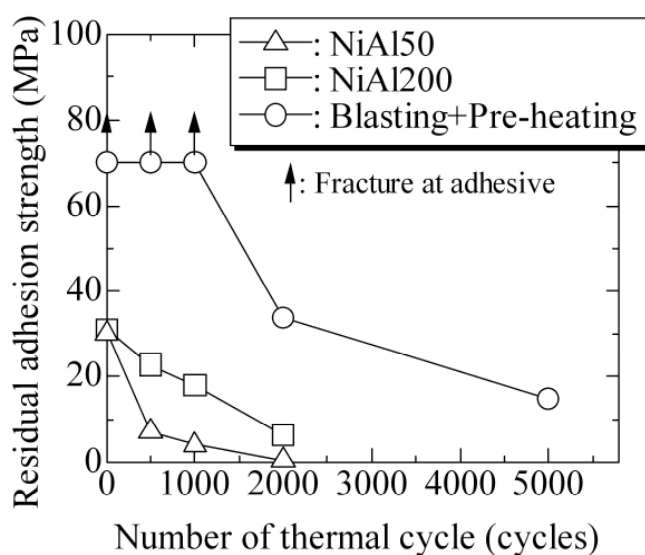


Fig.4 Relationship between the residual adhesion strength and the thermal cycle.

3. コーティング端部形状の最適化に関する解析的検討

3.1 コーティング端部形状と応力特異性

代表的な電磁調理器用アルミ器具とその断面の模式図を Fig.5 に示す. Fig.5 に模擬的に示すように, コーティング端部においては段差の有無, 界面と自由平面との角度などに任意性がある. 一方, 一般に, 異材界面端部においては応力場が特異性を示し, さらにその応力特異性のオーダーは端部形状によって大きく変化することが知られている¹⁾. 応力特異性のオーダーが高い場合, 界面き裂の発生・進展が促進されることが容易に予想されることから, コーティング端部においては特異性を低減するような界面形状を選択する必要がある. そこで, Fig.5 の模擬図のように, 段差がある場合 (Case 1 とする) と段差がない場合 (Case 2) の2つのケースに対して, 界面と自由平面との角度を変数として, 応力特異性のオーダーを解析により求めた.

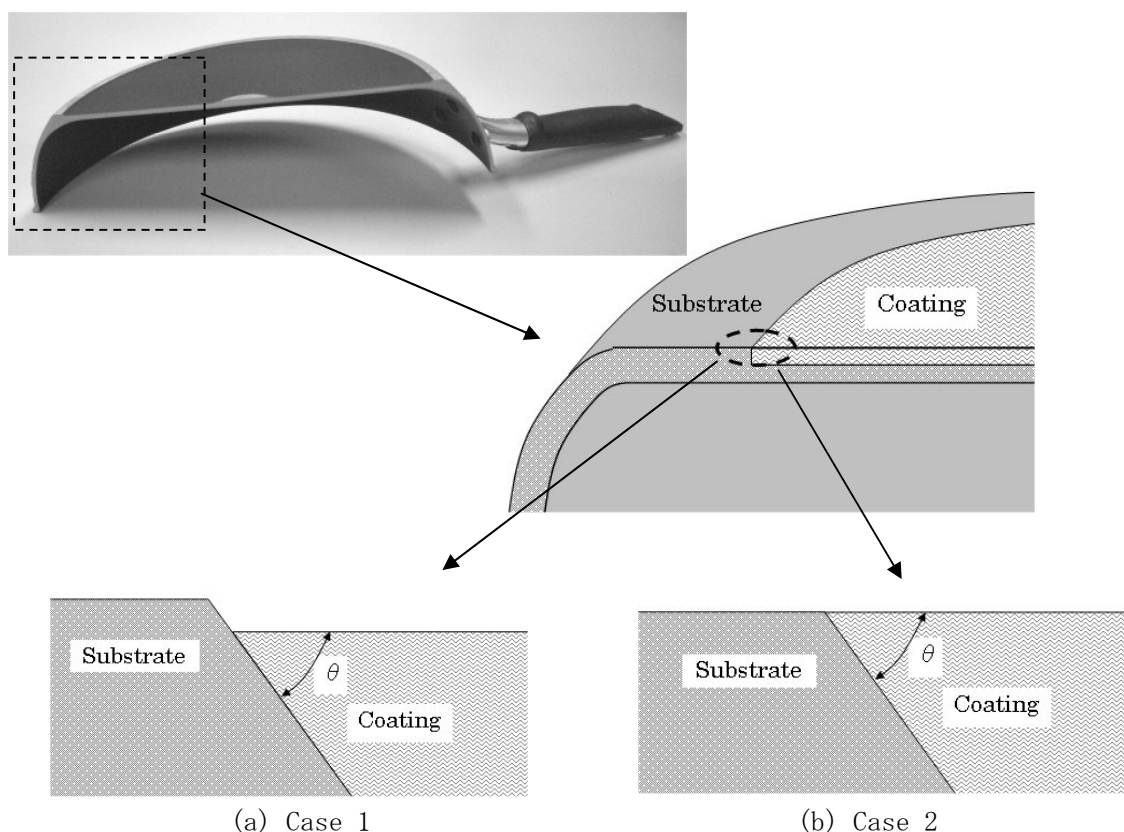


Fig.5 Edge geometries of the coating in a Fe-alloy coated aluminum cooking appliance.

3.2 材料特性試験

解析にあたり, 基材, ボンドコート, トップコート各部材の材料特性 (弾性係数と熱膨張係数) が必要不可欠であることから, 各部材の材料定数を評価した. 得られた結果を Table 1 に示す. なお, As-sprayed 状態のトップコートおよびボンドコートでは, 熱膨張係数の測定時にヒステリシス挙動が認められたことから, ヒステリシス挙動が安定する 3cycle 以降の熱サイクル時の膨張・収縮挙動から熱膨張係数を評価した.

Table 1 Mechanical properties of top-coating, bond-coating and substrate alloy.

Materials	Elastic modulus [GPa]	Thermal expansion coefficient [1/K]
Fe-alloy coating	243	13.9×10^{-6}
NiAl coating	238	13.9×10^{-6}
Al-alloy, AC4A	75	22.0×10^{-6}

3.3 解析結果

Fig. 6 に解析より得た Fe 溶射 Al 合金の界面端部における応力特異性のオーダー λ と界面／自由表面角度 θ の関係を示す．図中の Case 1 および Case 2 がそれぞれ Fig. 6(a) および(b)の界面端部形状に対応している．Fig. 6 より, Case 2 の $\theta = 60^\circ$ 近傍で $\lambda = 0$, すなわち, 界面端部における応力特異性が消失している．従って, 界面端部に段差が無く, 界面／自由表面の角度 θ を 60° 程度にすることにより, Fe 合金を溶射した Al 合金調理器具の熱疲労寿命を延伸できることが期待される．

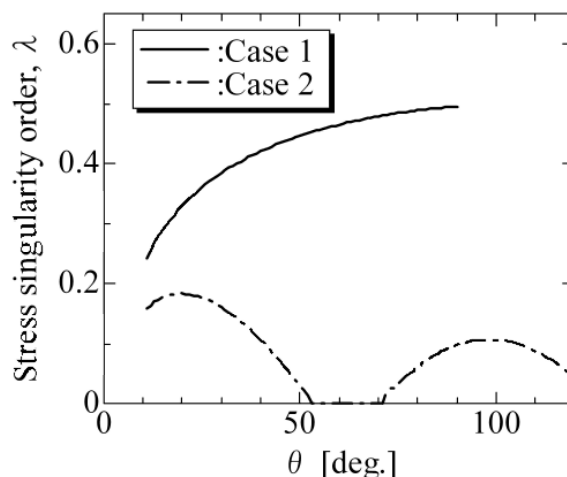


Fig.6 Relationship between the stress singularity order and the interface angle.

4. おわりに

本研究では, 溶射調理器具の長寿命化と溶射プロセスの最適化を目指し, Al 合金を基材として鉄系皮膜を溶射したコーティング材の残存密着強度を評価し, 熱疲労強度に及ぼすボンドコートプロセスの影響について検討した. 併せて, 解析的に皮膜端部の応力特異性を検討した. そして, 耐熱疲労特性に優れたコーティング施工法およびコーティング端部形状を明らかにした.

謝辞

本研究を遂行するにあたり, 平成 18 年度新潟工科大学学内共同研究費の助成を受けた. 関係各位に謝意を表す.

参考文献

- [1] 結城良治編：界面の力学；培風館，1993 年 2 月．