

HVOF およびプラズマ溶射したアルミナ被覆ステンレス鋼の疲労挙動

Fatigue Behaviour of Stainless Steel Coated with HVOF and Plasma Sprayed Alumina Ceramics

学 ○岡田 博成 (岐阜大院) 正 植松 美彦 (岐阜大工) 正 戸梶 恵郎 (岐阜大工)
小林 圭史 (トーカロ) 原田 良夫 (トーカロ)

Hironari OKADA, Graduate Student, Gifu University, Yanagido, Gifu 501-1193
Yoshihiko UEMATSU, Gifu University
Keiro TOKAJI, Gifu University
Keiji KOBAYASHI, TOCALO, Co., Ltd.
Yoshio HARADA, TOCALO, Co., Ltd.

Key Words: Fatigue, HVOF, Plasam spray, Stainless steel, Ceramic coating

1. 緒 言

構造材料の使用環境の苛酷化に伴って、既存材料の特性を改善する試みが為されている。そのひとつの手段として溶射処理がある。溶射処理は金属、サーメットおよびセラミックスなどの種々の溶射材料の選択が可能であり、また厚い皮膜が容易に形成できるなどの特徴を有する。皮膜の被覆によって基材の特性を損なわず、耐熱性、耐摩耗性、耐食性などの特性を付与できることから、工業的に幅広く利用されているが、今後さらに適用範囲の拡大が予想される。それに伴って被覆材の強度、とりわけ疲労挙動の評価がますます重要になっている。

溶射処理には大気圧プラズマ溶射 (Atmospheric Plasma Spraying, APS) と高速フレーム溶射 (High Velocity Oxygen Fuel, HVOF) がある。従来、セラミックスの溶射には APS が用いられている。一方、HVOF は溶射粒子を高速で発射するため、低気孔率、高密着性、高強度の皮膜が形成され、セラミックス以外の溶射では良好な特性が得られている。しかし、セラミックスを溶射した被覆材について検討した研究はほとんど見られない。

そこで本研究では、HVOF をアルミナ・セラミックスの溶射に適用し、2 種類の皮膜厚さを有する被覆材の疲労挙動を評価するとともに、APS 被覆材と比較、検討する。

2. 実験方法

2.1 供試材および試験片 基材として市販の冷間仕上げマルテンサイト系ステンレス鋼 SUS403 を用いた。納入材に $950^{\circ}\text{C} \cdot 30$ 分の焼入れ後、 $600^{\circ} \cdot 30$ 分の焼戻しの熱処理を施した。その後、最小断面直径 5.5mm の砂時計型疲労試験片に機械加工した。

溶射処理は HVOF と APS であり、試験片にブラスト処理を施した後にアルミナを溶射した。皮膜厚さ t_c は公称 $150\mu\text{m}$ と $300\mu\text{m}$ の 2 種類である。

2.2 試験方法 疲労試験には片持ち回転曲げ疲労試験機を用い、室温大気中、繰返し速度 $f=19\text{Hz}$ で実験を行った。皮膜や破面の観察には走査型電子顕微鏡 (SEM) を用いた。

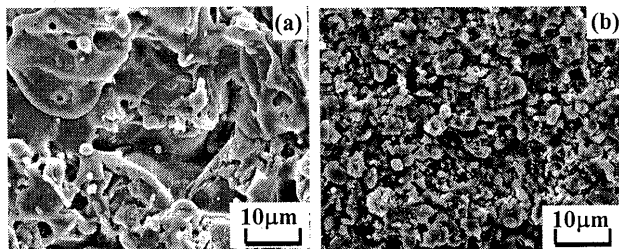


Fig.1 Microstructures of coatings observed at surface:
(a) APS, (b) HVOF.

3. 実験結果

3.1 皮膜組織評価 被覆材の皮膜表面の SEM 写真を図 1 に示す。APS の場合 (図 1(a))、アルミナ粒子が基材表面、または皮膜表面に高温熔融状態で積層されるため、急冷凝固によるマイクロクラックが見られる。一方 HVOF の場合 (図 1(b))、APS に比べて温度が低いために完全に熔融していない粒状の粒子が多数見られる。この観察からは HVOF 皮膜の特徴である高密度、すなわち低気孔率は確認できない。なお、実測した t_c は公称 $150\mu\text{m}$ に対して $110\sim 160\mu\text{m}$ 、 $300\mu\text{m}$ に対して $270\sim 340\mu\text{m}$ であった。

3.2 疲労挙動

3.2.1 疲労強度 図 2 に基材、プラスト材、APS および HVOF アルミナ被覆材の疲労試験結果を示す。図 2(a)は皮膜厚さを考慮した応力 σ_n 、図 2(b)は皮膜厚さを除外した応

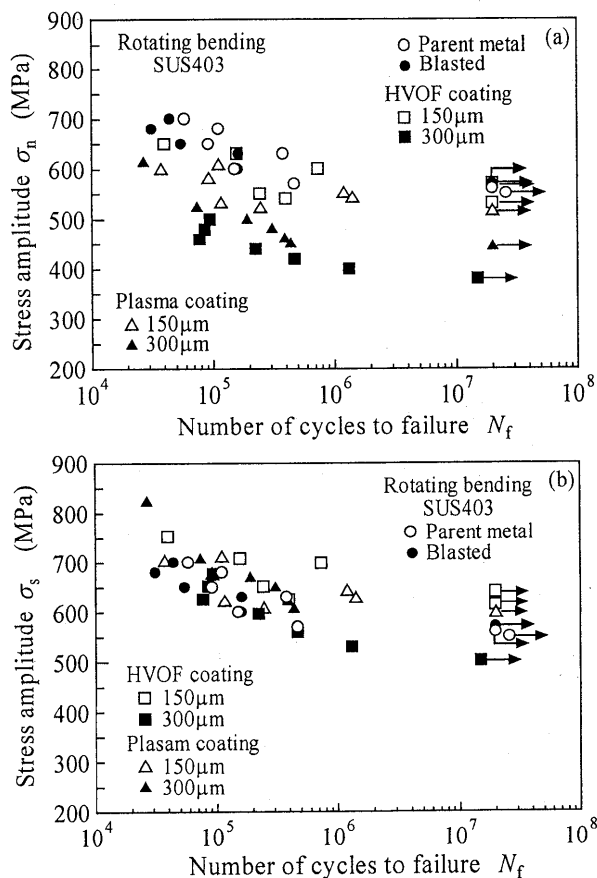


Fig.2 S-N diagrams characterized in terms of (a) stress including coating thickness, (b) stress excluding coating thickness.

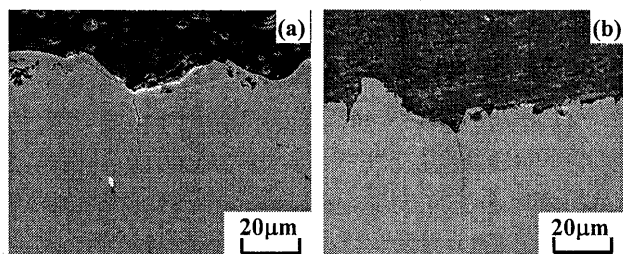


Fig.3 Examples of SEM micrographs showing crack initiation at parent metal under cyclic loading ($\sigma_n=600$ MPa): (a) APS, 150 μ m, (b) HVOF, 150 μ m.

力 σ_n で表したものである。基材にブラスト処理を施すと、疲労限度は基材と同程度であるが、有限寿命域の疲労寿命はわずかに短くなる。これはブラスト処理によって生ずる表面粗さが原因と考えられる。図 2(a)では、被覆材の疲労強度は APS, HVOF にかかわらずブラスト材よりも低下し、皮膜厚さが厚いほど低い。 $t_c=150\mu\text{m}$ の場合、被覆材の疲労強度は APS より HVOF のほうが優れるが、 $t_c=300\mu\text{m}$ の場合、逆に APS のほうが HVOF より高い疲労強度を示す。一方、図 2(b)では、APS 被覆材の疲労強度は皮膜厚さにかかわらずブラスト材よりもやや高くなるが、HVOF 被覆材の疲労強度は皮膜厚さに依存し、 $t_c=150\mu\text{m}$ の場合、疲労強度はブラスト材よりもかなり高く、逆に $t_c=300\mu\text{m}$ の場合、同等またはわずかに低下している。この結果は $t_c=300\mu\text{m}$ の HVOF 被覆材を除いて、皮膜が有効に応力を負担していることを示唆しており、とりわけ $t_c=150\mu\text{m}$ の HVOF 皮膜において顕著である。こうした皮膜の応力負担における差異は、皮膜内に含まれる気孔やマイクロクラック、繰返し中の皮膜と基材の剥離や繰返しによって生ずる皮膜内のき裂などの存在の程度に依存すると考えられる。

3.2.2 断面観察 $t_c=150\mu\text{m}$ の APS および HVOF 被覆材の縦断面観察結果を図 3 に示す。これは皮膜表面にき裂が認められると同時に試験を中断し、試験片を軸方向に切断して観察したものである。いずれの被覆材においても、皮膜の割れに先んじて基材の凹部からき裂が発生し、内部方向に成長していたことがわかる。この写真のき裂は観察された複数のき裂のひとつである。こうしたき裂の発生と成長が被覆材の疲労強度を決定していると考えられる。

同様の観察結果を $t_c=300\mu\text{m}$ の APS および HVOF 被覆材について図 4 に示す。APS 被覆材の場合、皮膜を貫通するき裂が見られ、またその下部で皮膜と基材の界面剥離が生じていることがわかる。一方、HVOF 被覆材の場合、繰返し負荷の早期に皮膜表面に多数のき裂が見られたが、皮膜内部においても、図に見られるように縦横方向に多数のき裂が認められる。しかし、界面剥離は観察されない。

4. 考 察

4.1 被覆材の疲労破壊機構

4.1.1 プラズマ溶射 (APS) APS 被覆材の場合、疲労強度の皮膜厚さ依存性は小さく、また皮膜厚さを考慮しない応力で整理すると、ブラスト材よりわずかに疲労強度は向上した。このことは皮膜が有効に荷重を負担することによって、基材の疲労強度を向上させたことを示している。最終的な破壊は、図 3(a)および図 4(a)に見られたとおり、 $t_c=150\mu\text{m}$ の場合はブラスト処理によって生じた基材の凹部の応力集中に起因して、 $t_c=300\mu\text{m}$ の場合は皮膜を貫通する割れの下部において界面が剥離し、その結果として基材に発生したき裂によって生じる。皮膜が応力負担するとともに、基材の変形を拘束する結果、基材におけるき裂発生を遅延させたと考えられる。

4.1.2 高速フレイム溶射 (HVOF) HVOF 被覆材の場合、APS 被覆材と異なり疲労強度の皮膜厚さ依存性が顕著であ

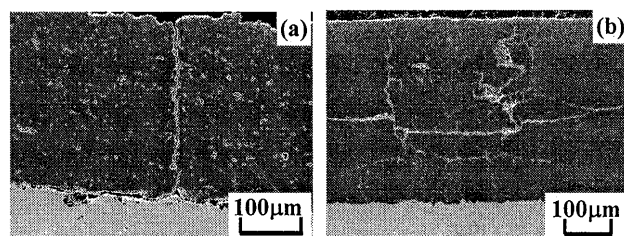


Fig.4 SEM micrographs showing cracks generated within coating under cyclic loading: (a) APS, 300 μ m, $\sigma=510$ MPa, (b) HVOF, 300 μ m, $\sigma=440$ MPa.

り、皮膜厚さを考慮しない応力で整理すると、 $t_c=150\mu\text{m}$ の被覆材の疲労強度はブラスト材よりもかなり向上するのに対して、 $t_c=300\mu\text{m}$ の被覆材では疲労強度は同等、またはわずかに低下した。 $t_c=150\mu\text{m}$ の場合、最終的な破壊機構は図 3 に見られるように APS 被覆材と同様であるが、皮膜と基材の密着性が APS よりも優れるために、基材のき裂発生を遅延させたことが疲労強度の向上の主因であると考えられる。一方、 $t_c=300\mu\text{m}$ の場合、繰返し負荷の早期に皮膜表面のみならず、内部にも多数のき裂が縦横方向に生じた。これによって皮膜は応力を負担できなくなるため、その疲労強度が上述の結果になったと考えられる。

4.2 疲労強度の向上における HVOF 被覆の優位性 疲労試験結果と断面観察を通じて、被覆材の疲労強度には皮膜の性質と基材との密着性が重要であることがわかった。HVOF 皮膜は APS 皮膜と比べて気孔率が低く、また基材との密着性に優れることが知られている。セラミックス皮膜の弾性係数は気孔率に依存するが、一般に基材よりも高いために皮膜には大きな応力が生じ、皮膜が厚いほど皮膜内の応力状態は厳しくなると考えられる。前述したように、HVOF 皮膜は APS 皮膜よりも低い気孔率に起因して高い弾性係数を有する。したがって、皮膜内の応力状態は APS 皮膜より厳しくなる。同時に、高い密着性のために基材の変形に追従できず、界面剥離ではなく皮膜割れによって変形の整合性を保つ。これらのことから、また $t_c=150\mu\text{m}$ の被覆材の疲労試験結果が示すように、HVOF では薄い皮膜のほうが、皮膜の優れた性質と密着性を活かして疲労強度の向上に有効になると考えられる。

5. 結 言

本研究では、HVOF をアルミナ・セラミックスの溶射に適用し、2種類の皮膜厚さ t_c を有する被覆材の疲労挙動を評価するとともに、APS 被覆材と比較、検討した。得られた主な結論は以下のとおりである。

(1) 疲労強度を皮膜厚さを考慮した応力で表すと、被覆材の疲労強度は APS, HVOF にかかわらずブラスト材よりも低下し、皮膜厚さが厚いほど低下した。 $t_c=150\mu\text{m}$ の場合、被覆材の疲労強度は APS より HVOF のほうが優れるが、 $t_c=300\mu\text{m}$ の場合、逆に APS のほうが HVOF より高い疲労強度を示した。

(2) 疲労強度を皮膜厚さを除外した応力で表すと、APS 被覆材の疲労強度は皮膜厚さにかかわらずブラスト材よりもやや高くなったが、HVOF 被覆材の疲労強度は皮膜厚さに依存し、 $t_c=150\mu\text{m}$ の場合、疲労強度はブラスト材よりもかなり高く、逆に $t_c=300\mu\text{m}$ の場合、同等、またはわずかに低下した。

(3) $t_c=150\mu\text{m}$ の場合、APS, HVOF にかかわらず基材の凹部よりき裂が発生したが、 $t_c=300\mu\text{m}$ の場合、APS では皮膜を貫通する割れと界面剥離が、HVOF では皮膜内に多数の縦横方向の割れが認められた。

(4) HVOF の場合、優れた皮膜の性質と密着性を活かすためには、薄い皮膜が有効であることを指摘した。

(参考文献省略)