ガスタービン表面処理の現状

永井 修造

* 川崎重工業株式会社ジェットエンジン事業部

Current Surface Treatment for Gas Turbine Engine

Shuzo Nagai*

*Jet Engine Division, Kawasaki Heavy Industries, Ltd.

Gas turbine engines are used for various purpose on aircrafts, ships, vehicles, industry machines, and electric generators. Surface treatments for gas turbine engines are using not only for corrosion privenitive but also for anti-fretting, anti-galling, improvement of fatigue life, abradable coating and thermal barrier coating.

In this report, outline of surface treatments for gas turbine engines and coating for turbine blades are explained.

1. ま え が き

ガスタービンは、その出力/重量比の大きさを特徴に、1940年代以降、航空機用エンジンとして、飛躍的な発達をみたが、近年は、冷却水不要、始動容易性、種々の燃料使用可能などの利点から、船用、車輛用、産業用、及び発電用として、広く産業界で用いられている。

たとえば、軍艦及び商船の主機として、十数箇国で使用され、仏、米、イラン等で鉄道車輛用エンジンとして、更には、石油パイプラインや水道ポンプの駆動源として各国で使用されている。また、川崎重工業(株)が独自に開発した 100~2000 kW 級ガスタービン発電機は、ここ数年で、国内だけでも 1,000 台以上、設置されている現状である。

このガスタービンエンジンにおいて、表面処理は重要な役割を果たしており、防食のみならず、耐磨耗性の向上、疲労寿命の向上、焼付防止等、幅広い目的をもって適用されている。

本稿では、これらの表面処理のアウトラインを概説し、次にガスタービンエンジンの心臓部ともいえる、タービンブレードの表面処理について述べる。

2. 表面処理の概要

ガスタービンは、図 1¹⁾ に示すように、低温のコンプレッサー部と、燃焼器部及び高温のタービン部の三つの部分に大別でき、表面処理は、これらの部分に何等かの形で適用されている。それらの具体例を次ページの表 1 に示す。

図1 ガスタービンの構成部¹⁾

* 〒673 兵庫県明石市川崎町 1-1 (1-1, Kawasaki-cho, Akashi, 673 Japan)

表1 ガスタービンの表面処理の一例

処 理 目 的	処 理 方 法	適 用 部 品		
		コンプレッサー	燃 焼 器	タ ー ビ ン
防 食	電気めっき(Cd, Ni-Cd, Pt)	ブレード	—	ブレード
	真空めっき(Al)	ボルト, ナット	—	—
	陽極処理(Ti, Mg, Al部品用)	ケーシング	—	—
	化成皮膜処理(Fe, Al, Mg部品用)	ギヤ, ハウジング	—	—
	塗装(エポキシ, ウレタン等)	ハウジング	—	—
	拡散皮膜処理(Al)	ブレード	—	ブレード
	溶射(Al, MCrAlY)	ケーシング	—	ブレード
耐 磨 耗	電気めっき(Cr)	シャフト	インナーライナー	シャフト
	無電解めっき(Ni-P, Ni-Ti-B)	ペーン	フレイムチューブ	ペーン
	複合めっき(Co-WC)			
	陽極処理(Ti, Al, Mg部品用)	ケーシング		—
	拡散皮膜処理(Cr)	—	インナーライナー	—
	溶射(WC, Cr炭化物, MCrAlY)	シャフト	インナーライナー	ブレードチップ
疲 勞 向 上	溶接(Co合金)	—	—	ブレード前縁
	表面焼入(高周波, レーザー, EB)	ギヤ, シャフト	—	—
	ショットピーニング	ディスク	—	ディスク
	湿式グラスビードピーニング	ブレード	—	ブレード
焼 付 防 止	浸炭	ギヤ, シャフト	—	—
	窒化			
	電気めっき(Ag, Pb, In)	ベアリング	—	ナット
	陽極処理(Ti部品用)	ケーシング	—	—
そ の 他	塗装(二硫化モリブデン, グラファイト)	ディスク	フレッティング部	ディスク
	溶射(Ni-Cu-In)	ブレード		ブレード
	電気めっき(Ag)	エアーシール	—	—
	溶射(アルミポリエステル, 窒化ボロン)	ケーシング		
そ の 他	溶射(ジルコニア, アルミナ)	—	インナーライナー	ブレード
	真空めっき(ジルコニア, アルミナ)			ノズル

2.1 防食を目的とした処理

表1に示すように、防食処理は主として、低温のコンプレッサー部に適用されている。これは、シャフト、ギヤ等の鉄部品が多いことと、重量軽減の目的で Al, Mg 合金が多用されている結果である。Al, Mg 合金は、耐食性が悪いので、通常、陽極処理または化成皮膜処理した後に塗装されて使用される。また、13Cr ステンレス鋼も、使用環境では酸化するために、アルミニウム塗装されて供せられる。特筆すべきものは、3年前にようやく国内で量産規模の処理ができるようになった真空めっきである。真空めっきは、通常のめっきの場合に生ずる水素吸蔵が全く無く、Cd の代わりに耐食性の良い Al を緻密に無公害でめっきできることが特徴である。図2に類似装置の例を示す。

2.2 耐摩耗性を目的とした処理

耐摩耗性が要求される部分は種々あるが、主たるものは、シャフトのベアリング嵌合部、ノズルペーンの取り付け部、及び燃焼器のフレッティング部であるといえ

う。これらの部分には、硬質 Cr めっき、WC, Cr 炭化物といった、硬度の高い耐摩耗材料が適用されている。

2.3 疲労寿命改善を目的とした処理

コンプレッサー及びタービンのディスクやブレードは回転体と呼ばれ、疲労特性が重要な部品である。そのため通常、疲労寿命改善のためにピーニングが施される。ピーニングは、鋼球を用いる場合とガラス球を用いる場合があるが、要求される残留圧縮応力の強さに応じて使い分けている。

その他、耐摩耗性を兼ねる処理に、浸炭、窒化処理がある。これらは、主としてギヤの歯面や、シャフトのスプライン表面の寿命を延長するために施されている。

2.4 焼付防止を目的とした処理

ベアリングのケーシング、ディスクとブレードの嵌合部、ナットの当たり面及びネジ部等において、金属同志が裸で接触すると必ずむしれ、焼付きを生ずるので、銀、インジウム、二硫化モリブデン等の固体潤滑剤を適用している。

図2 真空めっき装置 (Ivadizer Equipment)²⁾

2.5 その他の目的を持った処理

これらは、狭い意味では、もはや表面処理の分野に入らないかも知れないが、上記のほかに、アブレードブル(こすり取られ易さ)や、遮熱を目的としたコーティングも適用されている。たとえば、ブレードの先端とケーシングの間隔が大きいと、圧縮効率が落ちるので、間隔がゼロになるように工夫している。その方法は、ケーシング内壁に、こすり取られ易い材料を厚く付けておき、エンジン運転時にブレードの先端で掻き取り、現物合わせで、間隔をゼロにする方法である。この皮膜を付ける手段として、溶射が多用されている。

また遮熱コーティングは、燃焼器やタービンブレードのメタル温度を下げ、寿命の延長を図るために施されるもので、断熱材としてジルコニアやアルミナを、主としてプラズマ溶射法により適用している。

3. タービンブレードの表面処理

タービンブレードに要求される特性として、高温強度及び耐酸化性、耐食性が挙げられる。近年、高温強度を追求するあまり、材料中の Al 量を増し、Cr 量を減少させた結果、耐食性が著しく劣化するという現象を生じた。そのために 1960 年代の半ば頃から、耐食性向上の必要性が再認識され、1970 年代には、IN 792, IN 738 という高温強度と耐食性を兼ね備えた材料が出現した³⁾。その後、タービン材料の開発は、更に高強度を追

い求めて、共晶合金や複合材料等の新しい材料開発の方向に向かっているが、耐食性を重視したブレード材料の開発の一つとして、一方向性凝固や単結晶ブレードの研究も行われている⁴⁾。単結晶ブレードの場合は、Zr, Hf, B のような粒界強化元素が不要となり、そのぶん、耐食性を向上させる元素の添加が可能となるため、合金組成の選択範囲が拡大できるという利点がある。

このような材料の動きはあるが、表面処理無しで、耐酸化性耐食性を満足する材料は、今のところ出現していない。

一方下記に、用途別にみた要求特性の一例を示すが、同じガスタービンであっても、使用状況により、要求特性はさまざまであることがわかる。

用 途	要 求 特 性
航空機用	主として耐酸化性が要求される
船 用	主として耐ホットコロージョン
車輛用	耐酸化性、耐エロージョン性
産業用 (内陸仕様)	耐酸化性
産業用 (海上仕様)	船用と同じ
産業用 (砂漠仕様)	車輛用と同じ
産業用 (低質油仕様)	上記の全特性

航空機用は、エンジン運用方法が単純であり、主として耐酸化性を重視した表面処理を行えばよいが、低質油を使用する産業用ガスタービンの場合は、それ以外に、耐食性、中でも耐ホットコロージョン性及び耐エロジ

図3 エロージョンの一例 (TYNE HP ローターブレード)⁶⁾

ョン性をも満足しなければならず、これらを同時に兼ね備えた表面処理は、今だ完成されていない。

以下に、エロージョンとホットコロージョンについて簡単に説明すると、

- ・エロージョン：吸入空気中のダスト、または未燃炭カーボンによる擦過侵食をいう。図3に、侵食の一例を示す⁶⁾。

- ・ホットコロージョン：吸入空気中の Na, NaCl, 燃料中の Na, S (硫黄) が燃焼器中で Na_2SO_4 を生成し、これがブレード表面で、母材の Ni と共晶反応することにより進行する腐食現象。硫化腐食とも呼ばれている。

一般に $800\sim 900^\circ\text{C}$ で生ずる腐食を高温ホットコロージョンと呼び、 $650\sim 750^\circ\text{C}$ で生ずる腐食を、低温ホットコロージョンと呼んでいる。後者は、1970 年代中頃に、船用エンジンでクローズアップされたものであり、NaCl 及び高濃度 S の下での $\text{NiSO}_4\text{-Na}_2\text{SO}_4\text{-CoSO}_4$ 共晶塩による腐食現象であると言われている^{6), 7)}。ホット

図4 ホットコロージョンの一例

図5 タービンブレードコーティングの発達^{4), 6), 8)}

コロージョンの一例を図4に示す。

このような背景のもとに、タービンブレードの表面処理は、第1世代から今や第4世代までの進歩を遂げている。これまでの情報をもとに、まとめたものを図5に示す^{4), 6), 8)}。第1世代の Al 拡散処理の寿命を1とした時の耐食寿命を比較すると、第2世代は約3倍になると推定される。第3及び第4世代は、被覆材の種類により、大幅に寿命は異なるが、適正材料を選択すれば、第3世代で4倍以上、第4世代で6倍以上の寿命が望めると推定される。

第1世代：第1世代の表面処理としては、耐酸化性の向上を目的とした Al 拡散皮膜処理及びその改良型が挙げられる。改良型には、皮膜の靱性の改善を図った Al-Mn コーティングや⁹⁾、耐食性の改善を図った Cr-Al の二重拡散処理、Al-Si コーティング等がある。

これらは、いずれも CVD 法 (Chemical Vapor Deposition) により適用されており、第2世代以降の表面処理に比べて最も低コストであること、及び空冷孔内部へ適用できる唯一の手段であることから、今もって、タービンブレードの主たる表面処理方法となっている。その典型的皮膜のミクロ組織を図6に示す。

第2世代：第2世代は、貴金属と第1世代の Al 拡散皮膜処理を組合わせた表面処理であり、耐食寿命は一挙に3倍程度まで延長された。この皮膜は、硬く脆弱であり、ブレードの疲労寿命を若干低下させる場合があるので、適用時には注意を要するが、高温、低温の両ホットコロージョンに、バランスの良い耐食性を有するため¹⁰⁾に、現在は幾つかの船用及び産業用ガスタービンに適用されている。

この表面処理は、まず、化学的または物理的方法によって、母材に貴金属 (白金族) を数ミクロンの厚さでめっきし、その後 CVD 法で Al を拡散させる手法により、皮膜を形成する。良い耐食寿命を維持するのは、皮膜中に形成された Pt-Al₂ 金属間化合物によるといわれており¹¹⁾、これは図6のミクロ組織の中で、表層の白色

図6 コーティング層のマイクロ組織

図7 第3世代コーティング手法概念図

うろこ雲状組織として認められる。

第3世代: 第3世代の表面処理は、1970年初期から本格的に研究され、種々の被覆材及び適用方法の開発改良が行われた。その結果、被覆材としては MCoCrAlY 合金 (M は主として Co や Ni) が選定され、適用方法としては、低圧プラズマ溶射法 (以下 LPPS と略す)、真空蒸着法 (以下 PVD と略す) 及びスパッタリング法の3種が、同等技術として確立された。これらの手法の概念を図7に示す。 LPPS は、減圧の不活性ガス中でプラズマ溶射を行うことにより、酸化物や空洞の無い良質の皮膜を得ることができる。 PVD やスパッタリングは、電子産業で用いられている装置と原理は同じであるが、厚膜が得られるように工夫されている。

この三つの手法によって得られた皮膜のマイクロ及び特性は、いずれも同じである。その典型的なマイクロ組織を図6に示すが、第1及び第2世代のマイクロとは全く異なる。

り、 Ni-Cr または Co-Cr の γ マトリックスに、 Ni-Al または Co-Al の存在する二相組織となっている。このほかに、同等皮膜を形成させる方法として、クラッド法も研究されているが、現在その成果が報告されるに至っていない。

皮膜の耐食性は、被覆材料によって異なり、高温酸化に対しては、アルミナ生成領域の組成の MCoCrAlY が有効であり、ホットコロージョンに対しては、クロム酸化物生成領域の組成の MCoCrAlY が有効である。耐ホットコロージョン性に関して一例を挙げると、 $20\text{Cr}13\text{Al}$ の CoCrAlY は耐酸化に優れ、高温ホットコロージョンに対しても比較的良好な耐食性をもつが、低温のそれに対しては弱い。一方 $40\text{Cr}8\text{Al}$ の CoCrAlY は、その逆の傾向をもっている。現在までに開発されている最もバランスの良い被覆材料は、筆者の知る限りでは $30\text{Cr}8\text{Al}$ の CoCrAlY である。

表2 表面処理適用の具体例^{9)~18)}

分 類	ガスタービン	ブレード材料	表 面 処 理	備 考
航空用	T 53 T 55	IN 713 C B 1910	Al拡散皮膜(第1世代)	ヘリコプター用 川崎重工で製造
	軍用ジェットエンジン	MM 246 PWA 1422	Al拡散皮膜(第1世代)	
	JT 9D	B 1900 Hf	外面CoCrAlY(第3世代) 内面Al拡散処理(第1世代)	ジャンボ旅客機用
	オリパスエンジン タインエンジン スベイエエンジン	IN 738 C	Al拡散皮膜または Pt-Al拡散皮膜(第2世代)	護衛艦主機 川崎重工で製造 第3世代のコーティングを検討中
船舶用	TF 25	IN 792 Mod	Al拡散皮膜	ホバークラフト用, 川崎重工で製造
	FT 4		Pt-Al拡散皮膜	貨物船主機
	MS 5002	IN 738		
	MS 5001 MS 7001	IN 738	Pt-Al拡散皮膜	GE社製造
産業用	MS 9001	GTD-111	LPPS CoCrAlY (第3世代)	Pt-Alの2倍の寿命をもつ
	不明	IN 738 C	LPPS CoCrAlYSi(第4世代)	BBC社製造
	M1A	IN 792 Mod	PVD CoCrAlY (第3世代)	川崎重工製造

第4世代: 第4世代とあえて位置付けしてみたが、これは、第3世代の改良型と定義されるべきかもしれない。処理手法は、第3世代の手法をそのまま引き継いでいるが、被覆材の改良が行われている。たとえば耐食性の良い MCr や MCrAlY 合金に貴金属や Ta, Si 等を添加または二重被覆し、耐食性の増大をねらっている。現在、欧州においては、産業用エンジンに数万時間の寿命をもたせるべく実機試験中であり¹²⁾、米国においては、船用エンジンに現状の4倍の寿命をもたせるべく試験中である⁴⁾。数万時間と一口に言うが、1年間は約9,000時間にしかないもので、気の長い試験である。

以上のように、第1から第4世代までの表面処理について述べてきたが、最後に、これらのコーティングの具体例を表2に紹介する^{9)~18)}。

軍用航空エンジンは寿命が短く、通常 Al 拡散処理が適用されているが、ジャンボ旅客機のような民間エンジンの場合は、1万時間寿命を目標としているため、第3世代のコーティングが適用されている。船用においては、厳しい腐食環境の下で、長時間の寿命が要求されているので、各ガスタービンの使用実績をみながら、第1世代から第4世代までのコーティングが適用または検討されている。産業用は数万時間という寿命が要求されるので、新しい表面処理が積極的に取り入れられている。欧州では、BBC 社やスルザー社が、欧州の溶射メーカーと共同で、第4世代の実機試験を継続中であり、米国では、NASA の指導の下に開発された新技術がすぐに各社で適用され、実機試験に供される情勢にある。日本

においては、近年多くのガスタービンメーカーが生まれているが、まだまだ経験不足の状況であり、今後種々の事例にぶつかりながら、上記のように改良研究に取り組むことになるであろう。

4. あとがき

日本におけるガスタービン産業の規模は、まだまだ小さく、しかもそのほとんどがライセンスものであることから、自主的な開発改良の動きが制約されている。しかし現在、国家的プロジェクトとして、高効率ガスタービンの研究、及び5箇国協同の航空エンジン V 2500 の開発が推進されとおり、これらを通じて、表面処理分野の研究の場も提供されている。今後の、この分野における一層のレベル向上を期待したい。

以上、舌足らずの解説になったと思われるが、詳細については、末尾の引用文献を御参照頂きたい。

(1985年6月6日受理)

文 献

- 1) C. T. Sims & W. C. Hagel: The Superalloys.
- 2) E. R. Fannin & D. E. Muehlberger: "Ivadizer Applied Aluminum Coating Improves Corrosion Protection of Aircraft", MCIC Report, MCIC-79-40.
- 3) P.C. Felix: "The Role of Corrosion in Modern Gas Turbine", High Temperature Gas Turbines, (1973).
- 4) S.B. Shepard: "NAVSEA Marine Gas Turbine

- Materials Development Program", *Naval Engineers Journal*, August, 65 (1981).
- 5) T. R. Shaw: "The Royal Navy's Service experience with Gas Turbine Engines", MCIC Report, MCIC-75-27.
 - 6) G. W. Goward: "Hot Corrosion of Gas Turbine Airfoils", MCIC Report, MCIC-77-33.
 - 7) L. F. Aprigliano: "Low Temperature (650 to 700°C) Burner Rig Testing" *Journal of Testing and Evaluation*, **10** [6] Nov. (1982).
 - 8) F. D. Lordi, A. D. Foster & W. F. Schilling: "Gas Turbine Bucket Coatings Reduce Corrosion Attack", *Modern Power System*, April, 37 (1983).
 - 9) K. H. Ryan, J. O. Hodshire & Q. O. Shockley: "Development of a Ductile Corrosion Resistant Coating for Turbine Component", MCIC report, MCIC-75-27.
 - 10) F. N. Davis & C. E. Grinnell: "Engine experience of Turbine Rotor Blade Materials and Coatings" ASME Paper, 82-GT-244.
 - 11) M. R. Jackson & J. R. Rairden: "The Aluminization of Platinum and Platinum-Coated IN-738", *Metallurgical Transactions A*, **8A**, Nov., 1697 (1977).
 - 12) H. W. Grünling & K. Schneider: "Coatings in Industrial Gas Turbines: Experience and Future Requirements", *Thin Solid Films*, **84**, 1 (1981).
 - 13) 中井盛男: *GTSJ*, **8** [29] 22 (1980).
 - 14) R. B. Tatge, C. R. Gordon & R. S. Conkey: ASME Paper, 80-GT-175.
 - 15) R. W. Smith, W. F. Schilling & H. M. Fox: ASME Paper, 80-GT-98.
 - 16) 樗木康夫, 徳永賢治, 西嶋庸正: 日立評論, **67** [2] 23 (1985).
 - 17) 中川幸也: 熱処理, **25** [2] 94 (1985).
 - 18) Chromalloy American 社 Catalogue (1981).