Ni 基超合金コーティング試験片の内部疲労き裂発生と進展挙動 Sub-surface crack initiation and propagation in Ni-based superalloy coatings

○学 田 卷 翼 (長岡技科大) 正 岡崎 正和 (長岡技科大) 正 阪口 基己 (長岡技科大)

○Tsubasa TAMAKI, Masakazu OKAZAKI, Motoki SAKAGUCHI

1603-1 Kamitomioka-machi, Nagaoka, Niigata, Japan

Key Words: Coating, Ni-based superalloy, Sub-surface crack, Potential drop

1. 緒言

航空用および産業用ガスタービンの高温部材には、その苛酷な動作環境に耐えるため、耐クリープ強度、高温疲労強度、耐食性や耐酸化性に優れた Ni 基超合金が用いられている。これら高温部材の多くは高価で高付加価値なものであるため、可能な限り補修して使用されている^[1]。しかしながら、現在採用されている溶射法、溶接法やろう付け法などの多くの補修法を適用する際には、入熱による変形、熱影響域の形成、更には補修部位の高温疲労破損などの材料強度的問題が懸念されている。その一方で、一般に補修部位のき裂の発生や進展挙動を知ることは容易ではない。

以上の背景を鑑み、本研究では、新たな高温部材補修法である放電コーティング法により補修模擬 Ni 基超合金試験片を準備し、それを用いて補修部位の疲労き裂発生と進展挙動を調査した。調査にあたっては、直流電位差法 (PD 法) によるき裂長さの非破壊検出法を援用した。

2. 実験方法

本研究では基材として Ni 基超合金 Alloy718 を、コーティング材として耐磨耗 Co 基合金である X-40 を使用した。皮膜は放電コーティング法により施工した (膜厚 400 μ m)。詳細は文献[2]に記載した。試験には Fig.1 に示すように、評点部中央に R0.8、深さ 1mm の環状切欠きを持つ環状切欠き試験片と幅 14mm $\times$ 厚さ 2mm の中央貫通切欠き試験片^[3]の 2 種類を用いた。皮膜は環状切欠き試験片の環状切欠き部と中央切欠き試験片の評点部の両面に施工した。各供試材の化学組成を Table.1 に示す。

Fig.2 は本研究で使用した試験系のブロック図であり、代

Fig.1 Geometry of fatigue test specimens.

Table.1 Chemical composition of specimen materials.

	Ni	Co	Cr	Fe	Nb	Mo	Ti	Al	W
Alloy 718	Bal.	<1.0	21.0	17.0	5.5	3.3	1.2	0.8	-
X-40	10.5	Bal.	25.5	<2.0	-	-	-	-	7.5

表として疲労き裂発生試験のものを示す。PD 法に用いた電流の供給は試験片のつかみ部に空けた直径 3mm の貫通穴から行った。電流密度は $2.38 \times 10^6 \text{ A/m}^2$ とした。電位差の測定にはセンシングワイヤーとして直径 0.3mm のアルメル線を用いた。センシングワイヤーは測定感度を最大限に高めるため、環状切欠きのエッジ近傍に取り付ける必要がある。そのため、本研究では皮膜の施工幅 (4mm) を考慮し、環状切欠きの上下部に 5mm 幅でセンシングワイヤーをスポット溶接により取り付けた。測定は 90° 毎に計 4 か所をデータロガーにより収録・測定した。疲労き裂進展試験の場合も同様に、試験片中央の皮膜の上下部にセンシングワイヤーを取り付け、表裏面の 2 箇所の測定を行った。測定に用いたサンプリング周波数は 2Hz とした。

本研究の疲労試験は荷重制御、応力比: $R_0=0.1$ 、繰返し周波数: $f=10\text{Hz}$ とし、高周波誘導加熱装置を用いて 650°C で行った。試験中の温度は K-type 熱電対で計測し、評点部内で $\pm 5^\circ\text{C}$ 以内になるように制御した。

Fig.2 Block diagram for DC potential measurement.

3. 実験結果および考察

3.1 高温疲労き裂発生

Fig.3 は $\sigma_a=320 \text{ MPa}$ 一定振幅下で、PD 法により測定した環状切欠き試験片における電位差 V と初期値 V_0 の比 (V/V_0) と疲労サイクル数の関係を示す。Fig.3 より、き裂発生・進展に伴い V/V_0 が確実に増加することがわかる。また、き裂進展に伴い、各測定点の増加率に変化が生じていることがわかる。この増加率の変化はき裂が発生した位置 (D 点付近) で最も顕著である。本研究ではき裂が確実に発生している V/V_0 の値を 1.01^[4] とし、き裂発生サイクルとした。この値に相当する V/V_0 値で試験を中断し、縦断面の観察をした結果、0.3mm 程度の深さのき裂が実際に観察され、これにより本手法を用いることで、皮膜表面からは観察することができないき裂の発生および位置を非破壊的に検出することが可能である。

3.2 高温疲労き裂進展

き裂進展速度は、取得した V/V_0 値をき裂長さへ変換し、き裂が 0.1mm 進展する毎のき裂長ささと疲労サイクル数を

用いて算出した。き裂長さの算出に用いた校正曲線には、H.H.JOHNSON の式^[5]を用いた。関係式を以下に示す。一連の検討に際しては、

$$\frac{V}{V_0} = \frac{\cosh^{-1}\left(\frac{\cosh \pi y/2W}{\cos \pi a/2W}\right)}{\cosh^{-1}\left(\frac{\cosh \pi y/2W}{\cos \pi a_0/2W}\right)} \quad (1)$$

ここで、 y ：電位差測定端子間隔の 1/2 (mm)、 W ：荷重点から試験片端面までの距離 (mm)、 a_0 ：初期き裂長さ (mm) である。ここで、PD 法によるき裂長さの正確性を検証するために、特定の V/V_0 値毎に破面に付けたピーチマークによる測定も併用して行っている。測定に用いたデータロガーの測定分解能を考えると、本手法により、試験片内部を進展するき裂を 0.015mm の精度で非破壊的に検出できることがわかる。

Fig.4 は基材試験片と皮膜を持つ X-40 coated 試験片のき裂進展速度： da/dN m/cycle と応力拡大係数範囲： ΔK MPam^{1/2} の関係を示す。図中のシンボルは●が基材試験片を、■が Coated 試験片の結果を示す。

Fig.4 において、本研究で取得した基材試験片の直接観察 (VM) 法(○)および PD 法 (●) のき裂進展試験結果の比較は、ほぼ同等のき裂進展速度を与えることを示す。この結果は、PD 法により取得したき裂進展速度が VM 法と同等の結果を得ることができることを示しており、VM 法によるき裂進展速度の取得が困難な Coated 試験片において、PD 法による測定が有効であることを示す。図中において、本研究の試験結果と合わせて L.Xiao ら^[6]と G.A.Osinkolu ら^[7]により取得された 650℃での Alloy718 のき裂進展試験結果を示す。これらのき裂進展速度と本研究で取得した基材試験片のそれはほぼ一致していることがわかる。

続いて、Coated 試験片の比較は、加圧熱処理 (Loading Heat Treatment: L.H.T.) の時間が長くなるにつれて、き裂進展速度が低下することがわかる。As-coated 試験片 (□) のき裂進展速度は基材試験片とほぼ同等である一方、10 時間の加圧熱処理を施した 10hrs L.H.T. coated 試験片 (■) のき裂進展速度は、 $\Delta K=11.6$ MPam^{1/2} において、基材試験片のその約 1/4 倍に低下し、250 時間の加圧熱処理を施した 250hrs L.H.T. coated 試験片 (■) のき裂進展速度においては、 $\Delta K=16.1$ MPam^{1/2} で、基材試験片のその約 1/14 倍に低下することもわかる。加えて、下限界応力拡大係数範囲： ΔK_{th} は基材試験片では、 $\Delta K_{th}=9.1$ MPam^{1/2} であるのに対し、250hrs L.H.T. coated 試験片においては $\Delta K_{th}=15.5$ MPam^{1/2} まで増加することがわかる。なお、き裂長さが約 3mm 以上になるまで皮膜表面に明らかなき裂は観察されなかった。

本研究で施工した放電コーティング層は、高温環境下における酸化および皮膜組織の焼結によって力学的特性が変化し、650℃ではビッカース硬さが 10 時間で 3 倍以上に上昇し、疲労寿命が増加することなどがこれまでの研究で明らかになっている^[8]ことから、放電コーティング層が高温負荷時間に依存した荷重分担能を持つようになり、更に皮膜が健全な場合には、き裂進展速度を大幅に減少する効果を持つと考えられる。

Fig.3 Experimental relation between V/V_0 and number of cycles.

Fig.4 Comparing of FCP behavior between substrate and coated specimen.

4. 結言

本研究では直流電位差法を用いて皮膜を持つ試験片の内部疲労き裂の発生および進展挙動の測定を行った。その結果、皮膜表面からは検出が困難な皮膜/基材界面から発生した疲労き裂の非破壊検出が可能となった。また、き裂進展試験によれば、皮膜を持つ試験片に対し加圧熱処理を施すことでき裂進展速度が低下することが示され、この高温疲労特性には、高温負荷時間に依存した皮膜の荷重分担の変化が影響していることが示唆された。

5.参考文献

- [1]Y.SAKAI et.al, *J. Gas Turbine Soc. Jpn.*, 33, pp.23-25
- [2]Annual Book of ASTM Standards: E647-00, 03.01, pp-615-641
- [3]R. KAMMA et.al, *J. Solid Mech. Mater. Eng.* (in press)
- [4]M.Ohnam et.al, *D.C. Potential Method of Crack Initiation Detection in High Temperature Low Cycle Fatigue -ISIJ Recommendation-*, pp.1-10
- [5]H.H.JOHNSON, *Mater. Res. Standards*, 5, pp.442-445
- [6]L.Xiao et.al, *Mater. Sci. Eng. A*, 428, pp.1-11
- [7]G.A.Osinkolu et.al, *Mater. Sci. Eng. A*, 356, pp.425-433
- [8]R.KAMMA et.al, *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng. A*, 76, pp.364-366