

京工織大[院] ○平野 靖典 京工織大 森田 辰郎 (株) 神戸製鋼所 熊切 正

中部大学 加賀谷 忠治 茨城大学 池永 勝

Fatigue Properties of DLC-Coated Ti-6Al-4V Alloy

Yasunori HIRANO, Tatsuro MORITA, Tadashi KUMAKIRI, Chuji KAGAYA and Masaru IKENAGA

1 緒 言

Ti-6Al-4V 合金は静的強度、延性およびじん性のバランスが良く、構造部材等として使用されているが、同チタン合金は耐磨耗性に劣り、焼きつきが生じやすいという問題を有する。一方、DLC 被覆処理は、耐磨耗性の改善上、極めて優れた処理であることから、Ti-6Al-4V 合金の耐磨耗性を改善するためにも有効であると考えられる。しかしながら、摺動部に用いられる機械部品は繰返し曲げ応力を受けることが多いため、DLC 被覆処理材については疲労特性についても十分に検討しなければならない¹⁾²⁾。

そこで本研究では、DLC 被覆処理を施した Ti-6Al-4V 合金について表面層の性状を調べるとともに、硬さ分布測定および引張試験等を行った後に平面曲げ疲労試験を行い、上記の表面改質が疲労特性に与える影響について詳細に検討した。また、DLC 層は硬い基材との密着力が高いとされていることから³⁾、Ti-6Al-4V 合金にプラズマ浸炭を施し、表面に形成された化合物層を除去した後に DLC 被覆処理を施した複合表面改質材についても、同様に上述の試験に供した。

2 実験方法

直径 14 mm の Ti-6Al-4V 合金丸棒を各試験片形状に機械加工後、試験部をエメリ研磨等により鏡面状に仕上げた。プラズマ浸炭は 1023 K、14.4 ks の条件で行い、また DLC 被覆処理は神戸製鋼所製 UBMS 装置により、全試験片を一括して行った。以上により、(1)未処理材、(2)プラズマ浸炭のみを施した材料(PC 材)、(3)DLC 被覆処理のみを施した材料(DLC 材)、(4)プラズマ浸炭を施し、形成される化合物層を除去した後に DLC 被覆処理を施した材料(PC+DLC 材)の合計 4 種類を準備した。DLC 材および PC+DLC 材に対しては、ボタン型試験片を用いて表面層の厚さ、硬さ、ヤング率の測定および密着性評価を行った。また、全ての材料について縦断面上で表面層の観察および硬さ分布測定を行った。さらに、各材を引張試

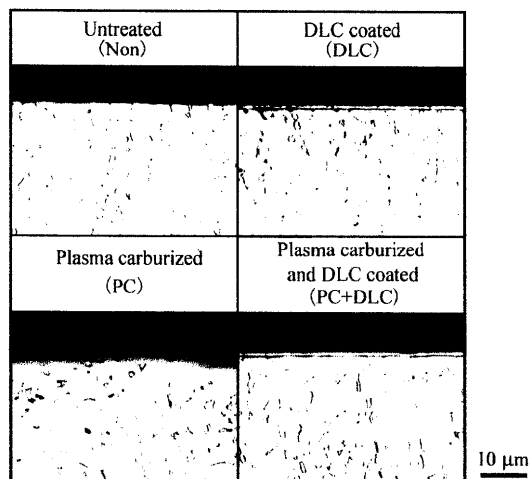


Fig.1 Feature near the surface and microstructure.

験(引張試験片 JIS Z 2201 No.14) および平面曲げ疲労試験(疲労試験片 JIS Z 2274 No.2, 応力比 $R=-1$, 繰返し速度 20 Hz, 室温・大気中)に供した。

3 実験結果および考察

3.1 表面改質層の性状と微視組織 Fig.1 に、縦断面上で観察した未処理材および各表面改質材の表面近傍の様相を示す。また Table 1 には、DLC 材および PC+DLC 材で測定した DLC 層の特性値を示す。Fig.1 より、DLC 材および PC+DLC 材の表面には厚さ 2 μm の DLC 層が形成されていることがわかる。また Table 1 に示すように、DLC 層は高いヤング率を有するとともに硬さが極めて高かった。しかしながら、PC+DLC 材における DLC 層の密着力は DLC 材の場合の半分程度であり、予想に反して第 1 段階のプラズマ浸炭が返って DLC 層の密着力を低下させる結果となった。

一方、未処理材と DLC 材の母材部で測定した α 粒径 (Table 2) は同じであり、DLC 被覆処理にともなう組織変化は生じなかった。また PC 材では、プラズマ浸炭時に受けた熱影響のため、組織が若干粗大化したが、その後の DLC 被覆処理にともなう組織変化は生じなかった。

3.2 硬さ分布 Fig.2 に、未処理材および各表面改質材の硬さ分布を示す。同図より、DLC 材では DLC 層下の母材部が若干硬化していることが確認できる。PC 材にはプラズマ浸炭にともない 60 μm の硬化層が形成されており、硬さは内部へ傾斜的に低下している。また、PC+DLC 材の硬さ分布は PC 材と同じであることから、プラズマ

Table 1 Fundamental characteristics of the DLC layers.

	Thickness (μm)	Surface roughness (nm)	Young's modulus (GPa)	Hardness (GPa)	Adhesion (N)
DLC	1.5	$R_a=30$ $R_z=540$	221	48.5	100
PC+DLC	1.9	$R_a=32$ $R_z=635$	265	55.7	41

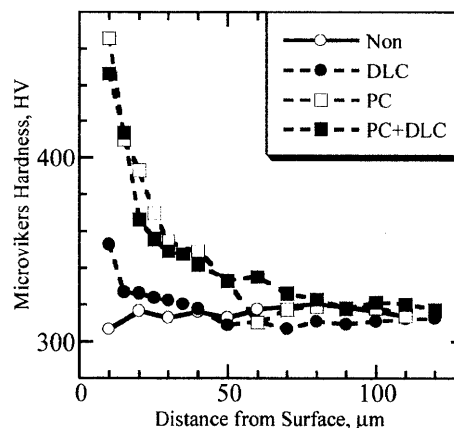


Fig.2 Hardness distribution.

浸炭により形成された硬化層の硬さ分布は DLC 被覆処理により影響を受けることはなかった。

3.3 機械的性質 Table 2 に、未処理材および各表面改質材の機械的性質を示す。同表において、未処理材と DLC 材の結果を比較すると、DLC 被覆処理にともない機械的性質に変化が生じないことがわかる。これは DLC 層が試験片の直径に対して非常に薄いので、材料全体のヤング率および引張強さが母材の性質により決定されるためである。PC 材の静的強度は、未処理材の場合と同程度であったが、伸びおよび断面収縮率は若干低下した。一方、PC 材と PC+DLC 材を比較すると、両材の機械的性質は同程度であることから、第 2 段階の DLC 被覆処理による影響はないと言える。

Fig.3 に、各材の引張試験後に観察した破断部近傍の側面様相を示す。DLC 材では表面層が荷重軸と垂直な方向に細かく割れているが、同層は母材と強固に密着しており引張試験時に剥離することはない。これに対して、PC+DLC 材では PC 材と同様に表面硬化層に比較的大きな割れが生じており、また表面の DLC 層には剥離が生じている。このことは、PC+DLC 材における DLC 層の密着力が DLC 材の場合の約半分 (Table 1) であり、同層が母材の変形に追従することができなかったためと考えられる。

3.4 疲労特性 Fig.4 に、未処理材および各表面改質材の S-N 曲線を示す。Fig.5 には、各材の破面上で観察した疲労き裂発生部の様相を示す。Fig.4 から理解されるように、DLC 材の疲労強度は未処理材より向上しており、DLC 被覆処理によって疲労強度の改善がなされた。また Fig.5 より、未処理材においてはき裂の発生起点が表面であるのに対し、DLC 材における発生起点は内部に位置することがわかる。このことから、DLC 層が表面からのき裂発生および進展を抑制したため、DLC 材の疲労強度および疲労寿命が改善されたと考えられる。

一方、未処理材に対し、PC 材の疲労強度は若干向上したが、疲労寿命は短くなった。Fig.5 からわかるように、PC 材では表面に形成された脆弱な化合物層に沿ってき裂が進展しており、このことが上述のように短寿命となった原因と考えられる。次に Fig.5 より、PC+DLC 材の疲労強度は PC 材の疲労強度より高水準となった。疲労強度が上昇した原因は、DLC 層がき裂の発生を抑制したと考えられる。しかしながら、PC+DLC 材の疲労強度が DLC 材の疲労強度よりも下回ったのは、脆弱な化合物層が残存しており、そこが弱部となり、疲労き裂の発生が容易となったためと考えられる。また Fig.5 より、同材における寿命は短寿命であり、このことから、同材における化合物層の除去が不完全であり、疲労寿命の短寿命化の原因になったと考えられる。

4 結 言

Ti-6Al-4V 合金に DLC 被覆処理を施すと形成された DLC 層が表面からのき裂発生を抑制し、その結果として疲労強度は 10% 改善された。一方、PC+DLC 材においては、DLC 層の密着力低下などのため、き裂の発生起点は表面となり、6% の疲労強度の改善に留まった。

参考文献

- 1) 森田辰郎, 富田幸太, 加賀谷忠治, 熊切 正, 池永 勝, DLC 被覆を施したステンレス鋼の疲労特性, 72, 126 (2006).
- 2) 西田新一, 服部信祐, 中原祐亮, 土山明美, チタン合金の疲労特性に及ぼす DLC コーティングの影響, 日本機械学会講演論文集, (2006).

- 3) 赤里孝一郎, DLC 膜の密着向上技術, トライボロジスト, 47, 809 (2002).

Table 2 Mechanical properties and α grain size of the substrate.

	Young's modulus (GPa)	Yield stress (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Reduction in area (%)	α grain size (μm)
Non	104	838	1006	12.2	42.0	5.1
DLC	109	855	967	12.5	43.8	5.3
PC	101	855	998	9.7	36.6	6.0
PC+DLC	109	865	969	10.6	38.7	5.7

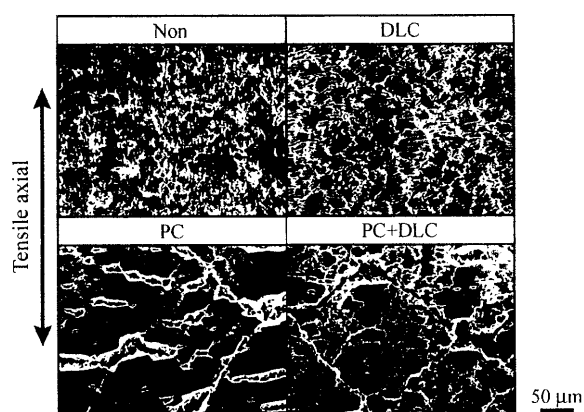


Fig.3 Features of the side surface after the tensile test.

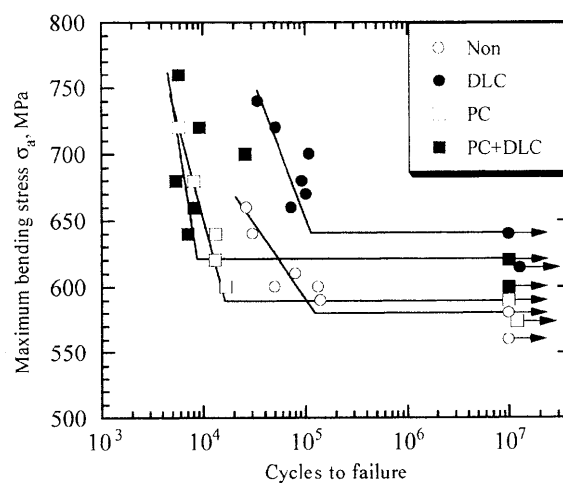


Fig.4 S-N curves.

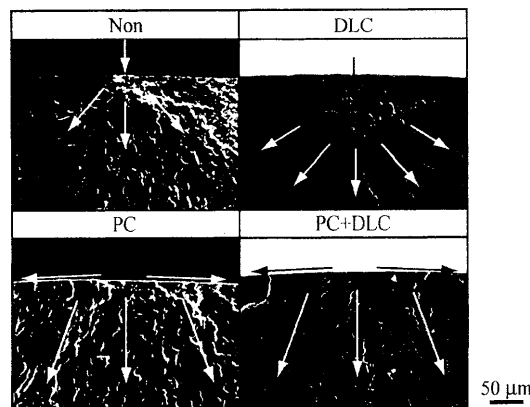


Fig.5 Feature of the fatigue fracture surface.