

DLC被覆を最終処理とする複合表面処理の摩擦摩耗特性および疲労強度に及ぼす効果

平成28年2月3日(水)に中丹技術支援室で開催した新分野進出支援講座「金属疲労を考慮した安心・安全なものづくりセミナー」で講演いただいた京都工芸繊維大学 森田辰郎准教授に寄稿いただきました。

DLC被覆と下地処理

近年注目されているDLC(diamond-like carbon)被覆は、1971年に発表されたAisenberg氏の論文に端を発すると言われてます。DLCはダイヤモンド構造とグラファイト構造の炭素から構成される非晶質材料であり、各種金属材料にDLC被覆を施せば大幅な摩擦係数の低減と著しい耐摩耗性の改善が同時に達成可能です。そのため、DLC被覆は現在、自動車部品、工具および金型等に広く用いられています。近年には、水素含有量の低減に基づくDLC層の高硬化化、珪素あるいはタングステン等の他元素のドーピングや積層化による機能性改善など、さらなる研究が積極的に進められています。

上述のように、DLC被覆は様々な機械部品の性能向上をもたらす優れた表面改質法です。しかしながら、形成されるDLC層を厚くすると高い残留応力の発生に起因して層内に割れが生じ、機能性が損なわれます。一方、厚さ数 μm ~数十 μm 程度の生成可能なDLC層は、高い接触力の作用下では容易に摩滅あるいは剥離します。そのため、DLC被覆を高い接触力が必然的に作用する歯車やベアリングなどに適用することは一般に困難であるとされています。

以上の背景から、著者はDLC層の耐久性を高めるため、同層の性能改善のみならず下地処理による硬化層の形成効果に着目して検討を進めてきました(図1)。得られた結果によると、表面硬化処理後にDLC被覆を施すことによりDLC層の耐久性が高められるだけでなく、摩擦係数を低減可能であることが明確に示されまし

た。同時に、この複合処理は機械的性質に影響を及ぼすことなく、実製品の安全性を保証する上で重要な疲労強度を改善することが明らかとなりました。DLC被覆は現在まで、もっぱら摩擦摩耗特性の改善を目的として研究されてきたことから、疲労特性を含めた系統的な検討は必ずしも十分になされていませんでした。しかしながら、著者が金属疲労を研究の中心に据えていたため、上記のようにDLC被覆材の疲労特性に係る重要な知見が得られました。

本稿では、実製品への応用を視野に入れてプラズマ窒化あるいはガス窒化後にDLC被覆を施した機械構造用合金鋼(SCM435)調質材を代表例とし、上記の複合処理が摩擦摩耗特性および疲労強度に及ぼす効果について紹介します。

摩擦摩耗特性

図2に、DLC被覆のみを施した材料(以後、DLC材)、プラズマ窒化後あるいはガス窒化後にDLC被覆を施した材料(PN/DLC材、GN/DLC材)の表面近傍の様相を断面上で観察した結果をまとめて示します。DLC被覆は、すべての材料に対して同一条件で施され、図から理解されるように、これら3種類の材料の表面には厚さ2 μm のDLC層が形成されました。PN/DLC材およびGN/DLC材には、それぞれ深さ200 μm および800 μm の硬化層がDLC層下に予め形成されました。硬化層の形成はスクラッチ試験時に母材部の塑性変形を抑制したため、DLC層の密着性は大幅に改善されました(図2中、 F_{ad} 参照)。



図1 研究の全体構想

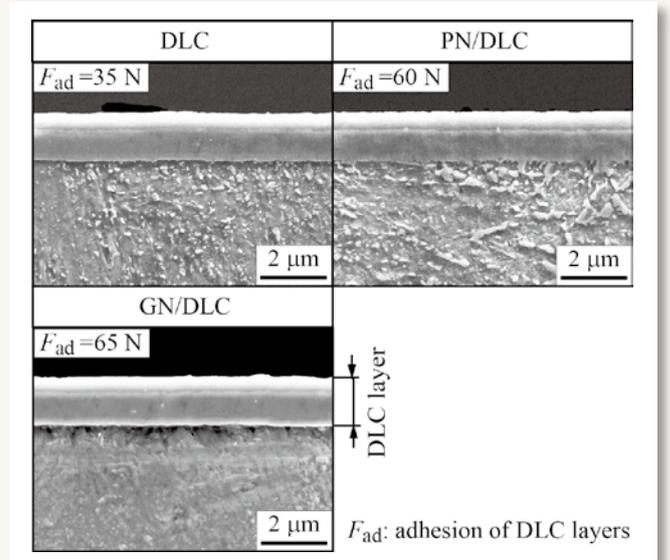


図2 DLC層の様相と密着力

図3に、ボールオンディスク摩擦摩耗試験後の摩耗痕の様相と断面形状をまとめて示します。この試験は、試験力29.3N(3kgf)の下で相手材に直径4.8mmのアルミナボールを用いてしゅう動距離450mまで実施されました。同図から明らかのように、DLC材ではDLC層が完全に摩滅し、摩耗痕は母材部に達していました。一方、下地処理を施したPN/DLC材およびGN/DLC材では、ほとん

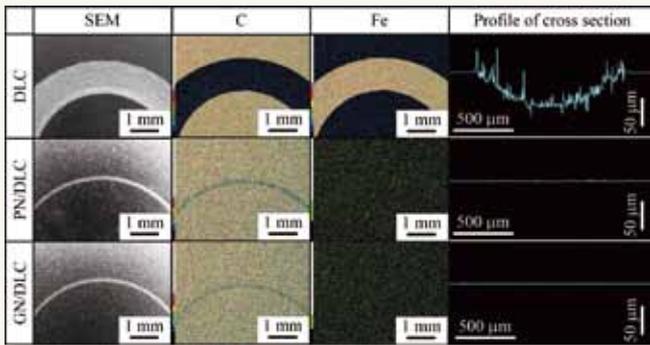


図3 摩耗痕の様相と断面形状

どDLC層の摩耗は生じておらず、それらの表面は試験後も平坦なままでした。

さらに、各DLC被覆材の摩擦摩耗特性における相違を明らかにするため、未処理材 (UN材) の摩擦係数0.5に達するまで各材の試験を実施しました。得られた結果を図4にまとめて示します。この図から明らかのように、DLC材は0.1程度と非常に低い摩擦係数を示しましたが、比較的早期にDLC層が失われて摩擦係数は未処理材と同じ水準に達しました。これに対し、下地処理を施したPN/DLC材およびGN/DLC材では、より長いしゅう動距離まで摩擦係数は低い水準に保たれ、硬化層の形成によりDLC層の耐久性が改善されたことを示しました。特に、厚い硬化層が形成されたGN/DLC材は3種類のDLC被覆材中で最も高い耐久性を有しただけでなく、摩擦係数は0.05程度と非常に低い値を推移しました。このように、厚い硬化層の形成は摩擦係数の低減という点でも効果的でした。

先述のようにDLC層の性能改善は重要であり、そのための各種研究は現在でも積極的に進められています。その一方で、上記の結果は下地処理による硬化層の形成がDLC被覆材の性能改善をもたらすことを意味しており、既存技術の援用によりDLC層の性能改善が容易に達成可能であることを強く示唆しました。では、なぜ同じDLC層が形成された場合にも下地処理の効果が顕著に現れたのでしょうか？

端的に説明するならば、まず下地処理による硬化層の形成がDLC層下で生じる母材部の塑性変形を抑制し、これによりDLC層の弾性変形が抑えられて表面の平面性が維持され、結果として均一な摩耗が生じたことが原因として考えられます。同時に、接触部の平面性が維持されると摩擦力が低減されるとともに、接触面圧が上昇してDLCのグラファイト化が促進されたため、摩擦係数が低減したと考えられます。以上の結果、下地処理による硬化層の形成にともない、DLC層の摩耗の抑制および摩擦係数の低減が同時に達成されたかと推察されます。

疲労強度

図5に、各材のS-N曲線をまとめて示します。比較のため、同図には先述のUN材および各DLC被覆材以外に、プラズマ窒化およびガス窒化のみを施した材料 (PN材、GN材) の結果を併せて示してあります。この図から理解されるように、窒化による表面硬化層の形成は表面からのき裂発生を抑制して疲労寿命および疲労強度を改善したため、PN材およびGN材のS-N曲線はUN材のそれよりも高い水準に位置しています。特に、厚い硬化層が形成されたGN材のS-N曲線は、非常に高い応力水準にあることが理解されます。

お問い合わせ先

京都府中小企業技術センター 中丹技術支援室 TEL:0773-43-4340 FAX:0773-43-4341 E-mail: chutan@mtc.pref.kyoto.lg.jp

UN材の疲労き裂は、表面近傍に位置する非金属介在物から発生しました。最表面に形成されたDLC層は、そこからのき裂発生を強く抑制したため、DLC材の疲労強度は顕著に改善されました。一方、表面硬化層が形成されたPN材およびGN材にDLC被覆を施した場合、DLC材ほどには顕著ではありませんでしたが、疲労強度を改善することはあっても低下をもたらすことはありませんでした。

著者が以前に実施した研究によれば、チタンおよびその合金の場合には窒化や浸炭により硬化層が形成された場合でも、脆弱な表面化合物層の形成および熱履歴にともなう母材部の組織成長等により顕著な疲労強度の低下が生じました。疲労強度の低下は、優れた基本性能を有する材料であっても、その応用範囲を狭めます。しかしながら、DLC被覆の場合にはチタン材を含めてそのような疲労特性の悪化はありませんでした。この観点からもDLC被覆の適用可能性は高く、実際、各種方面で多用されるに至っています。

最後に

DLC被覆が工業的に直面している問題は、費用対効果の向上と用途開発です。DLC被覆に係る優れた技術を開発された技術者や研究者には、枚挙に暇がありません。しかしながら、それが実用に供せられ、そして社会に貢献して初めて技術の真価は明確になります。著者には、実製品に対する応用技術を考える際に悩ましく思っている一つの言葉があります。それは、「良い製品が必ずしも売れるわけではない。認知され、多く売れる製品が良い製品なのだ」です。著者は大学で研究を進める際にも、この言葉を忘れたことはありません。

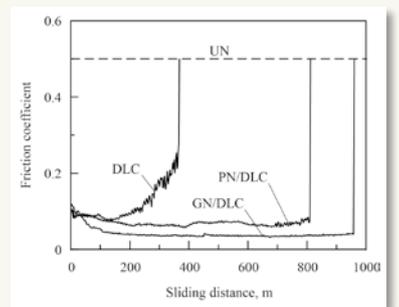


図4 摩擦摩耗試験結果

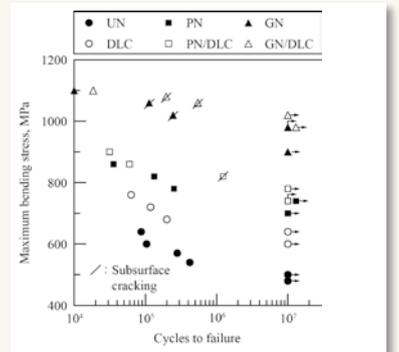


図5 S-N曲線



森田 辰郎 氏

博士 (工学)、Chartered Engineer (英国技術士)、MIMechE (英国機械学会会員資格)
 1987年慶應義塾大学理工学部機械工学科卒業、1989年同大学院理工学研究科前期博士課程機械工学専攻修了、1991年同後期博士課程機械工学専攻2年次中退、同年京都工芸繊維大学助手、1993年慶應義塾大学博士 (工学)、1998~1999年米国Northwestern大学客員研究員、2000年京都工芸繊維大学助教授 (現准教授)、2004年より京都教育大学非常勤講師兼務、現在に至る。