浸炭歯車材の TiC 被覆処理による疲労強度への影響*

橋本 宗 到*¹, 白鳥 正 樹*²
長嶋 晋 一*³, 齊藤 和 宏*⁴Effects by Coating with Titanium Carbide
of Carburized Gear Steel on Fatigue StrengthMunetoh HASHIMOTO, Masaki SHIRATORI,
Shin-ichi NAGASHIMA and Kazuhiro SAITO

The purpose of this study is to investigate the fatigue strength of carburized gear steel chemically vapor deposited with titanium carbide, and to clarify the main effect of carburized gear steel coated with titanium carbide on fatigue strength, including comparison with noncoated steel. Case depth of carburized gear d_{eff} is 1.3 mm. Quenching and tempering heat treatment after coating was also introduced. Smooth specimen, that is, flat plates and spur gear, module 4 with number of teeth 55, were supplied to fatigue test. Residual stress in TiC surface layer and substrate was detected by X-ray diffraction method. It is concluded that main effect on fatigue strength of chemically coated steel on carburized steel is substrate hardness near surface layer, and residual stress in titanium carbide layer doesn't effect prominently on fatigue strength. And finally it is found that the residual stress in both TiC layer and substrate near interface indicates possibility of a micro crack initiation at the interface between titanium carbide and substrate.

Key Words: Fatigue Strength, Coating, Titanium Carbide, Spur Gear, Residual Stress, Hardness

1. 緒 言

歯車は近年、伝達トルクの増大とコンパクト性への要求が高まりつつある。その要求に対応するためには、歯車の歯車曲げ強度と面圧強度の両面の向上が必要である。この点に関しては、表面の硬度を母材硬さより上昇させる、表面硬化処理法が有効であり、歯車には、浸炭焼入れ、ショットピーニング等の表面硬化法が、盛んに用いられている。

本報では浸炭焼入れ歯車材に、化学的表面硬化法の一つである CVD 法(化学的蒸着法)を適用し、その曲げ疲労強度を把握することとした。つまり、浸炭焼入れ材に、CVD 法により浸炭層よりさらに硬い TiC 層の薄膜を形成させ、浸炭焼入れ材と比較することにより、曲げ疲労強度に関し、実用に供し得るものかどうかを調べることにした。

本来、TiC は耐摩耗性向上のため、工具材等に盛んに用いられている。したがって、TiC 被覆処理鋼材の摩擦・摩耗に関する研究は、TiC 層の残留応力計測結果を含め、多く見受けられる^{(1)~(4)}。しかし、歯車用浸炭焼入れ材に TiC 被覆した熱処理材の摩擦・摩耗の研究⁽⁵⁾、および曲げ疲労強度に関する研究はほとんど行われていない。

この被覆歯車の適用領域としては、一般産業分野のほかに、無潤滑が要求される宇宙航空機器関連の位置制御用駆動源等が有望な分野と考えられる。

本報では、著者らが行った、浸炭焼入れ歯車材に TiC 被覆処理した材料の一連の強度に関する研究の中で、曲げ疲労強度の特性とその要因について報告することとした。

本論文の目的は浸炭焼入れ材に TiC を被覆した材料について、処理したままの場合、および TiC 被覆後の熱処理によく用いられる QT 処理を施した場合の疲労強度と強度因子を明らかにすることにより、浸炭焼入れ後 TiC 被覆した鋼材の曲げ疲労強度に関する、熱処理上の示唆を得ることにある。

2. 実 験

2・1 試験片 供試材は SCM 822 H 鋼である。化

* 平成元年 11 月 7 日 歯車および伝動機構シンポジウムにおいて講演、原稿受付 平成 4 年 5 月 28 日。

*¹ 正員、横浜国立大学工学部〔現：住友重機械工業(株)PTC 事業本部アクチュエータ研究開発センター(〒474 大府市朝日町 6-1)〕。

*² 正員、横浜国立大学工学部(〒240 横浜市保土ヶ谷区常盤台 156)。

*³ 新日本製鉄(株)第一技研(〒211 川崎市中原区井田 1618)。

*⁴ 学生員、横浜国立大学大学院。

学成分を表 1 に示す。曲げ疲労試験片と残留応力計測用試験片のなかで、平滑材の形状と寸法を図 1 に示す。平歯車は、モジュール $m=4$ 、歯数 $z=55$ 、歯幅 45 mm である。平歯車の危険断面部の歯厚 8.7 mm と平滑材の板厚 9.0 mm とはほぼ等しい。FEM 解析結果によると歯元部の弾性応力集中係数 $K_T=1.75$ である。

2.2 熱処理工程 素材の加工と歯切り、および研削後の熱処理工程を図 2 に示す。各試験片ともまずガス浸炭焼入れされる。(以後、ここでは浸炭焼入れを浸炭と表記する。) 浸炭による有効浸炭深さ $d_{\text{eff}}=1.3$ mm (Hv550 までの表面からの深さ) とした。浸炭のみのままの試験片を除き、その後、表面層を 0.1 mm 研削した。表面研削された試験片は大気中 950°C で 10 時間 CVD 用炉にて TiC 被覆される。一部の試験片は、その後焼入れ・焼戻し (以後 QT と略記) 処理される。また、平滑材の一部の試験片には防炭処理を施すことにより、浸炭と同熱処理で被覆なしの試験片を得た。

浸炭研削後 TiC 被覆処理した場合と TiC 被覆後 QT 処理を施した場合の表面層近傍の組織写真を図 3 に示す。前者は TiC 層直下はフェライト相とオーステナイト相の混相状態であり、後者はマルテンサイト相組織である。TiC 層の厚さは 6~7 μm である。EPMA による線分析結果を図 4 に示す。図 4 によれば Ti の母材層部への拡散が若干見られる。表面被覆層は TiC が形成されている。

表 1 化学成分

Material	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu
SCM822H	0.22	0.32	0.79	0.023	0.011	0.07	1.04	0.35	0.10

(a) 残留応力計測用試験片

(b) 曲げ疲労試験片平滑材

図 1 試験片の形状と寸法 (歯車除く)

2.3 残留応力計測 TiC 層の残留応力および母材の残留応力は X 線回折による応力測定法を用いて求めた。TiC 層の残留応力は Cu $K\alpha$ 線の (422) 回折、母材の残留応力は Co $K\alpha$ 線の (211) 回折強度から、 $2\theta - \sin^2 \psi$ 線図を求め、次式から算出した。

図 2 熱処理工程

(a) TiC 被覆処理 (b) TiC 被覆後 QT 処理

図 3 浸炭焼入れ後の TiC 被覆処理材の表面組織

図 4 EPMA 線分析結果

$$\sigma_R = -\frac{E \cdot \cot \theta_0}{2(1+\nu)} \cdot \frac{\partial(2\theta)}{\partial(\sin^2 \phi)} \cdot \frac{\pi}{180} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 σ_R は残留応力、 E はヤング率 (TiC: 4.96×10^5 MPa, Fe: 2.10×10^5 MPa), ν はポアソン比 (TiC: 0.19, Fe: 0.28), θ_0 は標準ブラック角である。

2・4 疲労試験 平滑材の曲げ疲労試験は三点曲げ方式にて実施した。平歯車の疲労試験はまたぎ歯方式により、ジグにて一定間隔の上下の歯を押え一定応力振幅の繰返し負荷を行った。

歯車の試験概要を図 5 に示す。波形は正弦波とし、試験装置は ± 200 kN 電気油圧制御式疲労試験機を用いた。

3. 結果と検討

3・1 疲労試験結果 平滑材と歯車の S-N 線図を図 6 と 7 にそれぞれ示す。平滑材の ΔS は最大曲げ応力発生部の応力範囲を、歯車の ΔS は G. Niemann の比較応力を示している。平滑材の場合、研削後浸炭処理しさらに表面研削を行うと研削のままで浸炭なしの場合と比較して疲労強度は、浸炭による硬化のため従来よく見られた傾向と同様に向上している。浸炭研削後の TiC 被覆処理効果と見てみると疲労強度はかなり低下している。TiC 被覆処理後 QT 処理を施すと、疲労強度は浸炭研削時よりやや低いもののほぼ同レベルまで上昇している。浸炭と同熱処理の場合は、疲労

限が浸炭研削の場合よりやや小さいものの、時間強度領域ではむしろ浸炭研削よりやや大きい。この理由として、浸炭研削材の残存異常酸化層、および疲労での圧縮残留応力の緩和等の影響が考えられる。詳細は今後の検討課題である。

歯車の場合も、平滑材とほぼ同様の傾向を示している。つまり、浸炭後 TiC 被覆処理した場合は、浸炭研削のみの場合と比較して、疲労強度が大きく低下するが、QT 処理により、浸炭研削とほぼ同レベルまで向上していることがわかる。また、浸炭後 TiC 被覆処理した場合は、平滑材の場合より、疲労強度の低下の割合が大きい。浸炭のみの場合は浸炭研削の場合より疲労強度がやや低くなっている。これは表面の異常酸化層と表面粗さの影響によるものと考えられる^{(6)~(7)}。

3・2 残留応力 浸炭のみと浸炭研削の場合の表面層の残留応力、および浸炭後 TiC 被覆処理した場合の TiC 層と母材表面部の残留応力を表 2 に示す。浸炭のみの場合、最表面は引張り残留応力状態である。著者らの研究によれば、これは表面粒界酸化層の形成によるものと考えている⁽⁹⁾。浸炭研削した場合の表面の残留応力は、従来の浸炭処理材に見られるように圧縮残留応力を示している。さらに内層部の残留応力は示していないが、従来の浸炭処理材の残留応力分布の傾向から⁽⁸⁾、圧縮残留応力を示すものと予測される。

表 2 残留応力計測結果

Heat treatment	TiC layer	Surface of substrate
as carburized	nothing	+ 99
grinding after carburizing	nothing	- 300
as TiC coated	-1492	-168
Q.T. after TiC coating	-2019	-544

図 5 歯車の試験概要

図 6 S-N 線図 (平滑材)

図 7 S-N 線図 (歯車)

一方、浸炭研削後、TiC 被覆処理した場合、TiC 層には浸炭層に見られた圧縮残留応力より大きい圧縮残留応力が存在するようになる。この TiC 層の圧縮残留応力は主に線膨張係数の差つまり熱ひずみに起因しているものと考えられるが、ほかに変態による結晶学的な格子欠陥に起因した応力緩和の影響も考えられる⁽²⁾。TiC 被覆処理後 QT 処理を施すと TiC 層の残留応力はさらに大きくなり、母材表面の残留応力も TiC 被覆のみの場合より絶対値が大きい。母材表面の TiC 層との境界部は EPMA 分析では Ti の母材への拡散が若干見られることから TiC と母材合金成分との混合状態と考えられる。したがって、母材表面は TiC の残留応力とのバランスから引張残留応力を示すものと考えられるが、Ti の拡散の影響が強く、圧縮残留応力を示したものと考えられる。さらに母材内部では引張り残留応力状態であると推察される。この点に関しては、TiC 層内部の残留応力を含めさらに確認していく必要がある。以上の残留応力計測結果と検討結果から、浸炭後 TiC 被覆処理した場合の内部応力分布、および曲げ荷重作用時の応力分布は図 8 のごとく、モデル化される。したがって、TiC 層と母材表面の境界は、マイクロクラック発生に関して影響を及ぼす可能性が大きいと考えられる。

3.3 疲労限と硬さ 浸炭、浸炭後 TiC 被覆および、浸炭 TiC 後 QT 処理した場合の母材表面近くの硬さ分布を図 9 に示す。

浸炭後 TiC 被覆処理と TiC 被覆後 QT 処理した場合も TiC の硬さは Hv 3 200 程度である。母材硬さについては、浸炭 TiC 被覆後 QT 処理を実施すると浸炭 TiC 被覆のみの場合より硬さは上昇しているが、

図 8 浸炭後 TiC 被覆処理した場合の内部応力と負荷時の発生応力分布モデル図

浸炭のときの硬さまでは表面層の硬さは達していない。これは熱処理工程の影響も考えられるが、他因として、母材表面の C の拡散移動による炭素量の低下も一因として考えられる。母材表面から 0.5 mm までの硬さの平均値をここで母材硬さとし、疲労限との関係を求めた結果が図 10 である。この図から、平滑材、歯車ともに、同様な疲労限と硬さの関係を示していることがわかる。つまり、歯切り、または、加工後浸炭することにより、表面硬さは上昇し、それとともに疲労限は上昇する。しかし、浸炭後 TiC 処理すると、TiC 処理温度が浸炭温度より高いこと、および徐冷の効果により、内部硬さが低下する。

組織的には母材表面と TiC との境界部は図 3 からわかるように、フェライト相、内部はパーライト相が形成されている。つまり、TiC 処理による母材の軟化とともに、疲労限は低下していることがわかる。TiC 被覆処理後 QT 処理を施すと母材はマルテンサイト相へ変態し、この母材硬度の上昇とともに疲労限は浸炭または浸炭研削の疲労限域まで向上している。

以上の熱処理過程に伴う、疲労限と硬さとの関係を図 10 の 1 → 2 → 3 → 4 → 5 の数字にて示している。

図 9 母材表面近傍の硬さ分布

図 10 疲労限と母材表面硬さとの関係

これらの結果から、浸炭後 TiC 被覆処理した場合の主影響因子は母材表層の硬さであり、浸炭後 TiC 被覆する場合は、QT 処理等の後熱処理により母材硬さを上げることが、曲げ疲労強度上重要であるといえる。

ただし、この母材表層の硬さを、表面層からどの深さにするかについては、さらに詳細な検討が必要と考えられるが、硬さの差が種々の材料において顕著に現れている箇所、例えば今回試みた母材表面から 0.5 mm [$0.5/d_{\text{eff}}$ (浸炭材の有効硬化層深さ Hv 550 までの深さ) ≈ 0.4] までの深さは、疲労限と硬さの關係に着目すると評価が可能な範囲と判断される。

4. 結 論

浸炭焼入れ材に、CVD 法により TiC 被覆処理を施した表面被覆材の曲げ疲労強度と主因子を明らかにし、曲げ疲労強度に関する熱処理上の指針を得ることを目的に試験研究を行った結果、以下の点が明らかとなった。

(1) 浸炭後 TiC 被覆処理のみの場合、疲労強度は浸炭の場合より低下する。その低下の割合は平滑材より歯車が大きい。

(2) TiC 被覆後 QT 処理を施すと疲労強度は浸炭研削のレベルまで上昇する。その傾向は平滑材・歯車ともほぼ同様である。

(3) 今回、試みに行った、母材表層から 0.5 mm ($0.5/d_{\text{eff}} \approx 0.4$) までの平均硬さと疲労限との關係から、

疲労強度の違いは、平滑材、歯車ともに母材表層硬さの差によるものであることがわかった。

(4) TiC 被覆処理した場合の疲労強度の影響因子は主に母材硬さであり、TiC 被覆後 QT 処理等を施すことは疲労強度上重要である。

(5) TiC 被覆処理した場合、TiC 層には大きい圧縮残留応力、母材表層部には TiC 層より小さい圧縮残留応力が存在する。したがって、TiC 層と母材境界の残留応力は、マイクロクラック発生に関し影響を及ぼす可能性が大きい。

試験片製作に関し、(株)名古屋ギヤ製作所、(株)極東窒化研究所、(株)東洋熱処理研究所の御協力があったことを記し厚く感謝する。

また疲労試験に協力していただいた住友重機械工業(株)平塚研究所 高橋本周、河口茂樹、中西伸行各氏に感謝の意を表す。

文 献

- (1) 津谷・石井, トライボロジスト, **34**-5 (1989), 348-351.
- (2) Sloof, W. G., Rijpema, H. J. M., Delhez, R., de Keijsen, Th. H. and Mittemeijer, E. J., *Surface Engineering*, **3**-1 (1987), 59-63.
- (3) 高瀬・遠藤・吉田・河上, 第 26 回 X 線材料強度に関するシンポジウム講演論文集, (1989-7), 154-159.
- (4) 橋本・長嶋・白鳥, 材料, **39**-437 (1990), 150.
- (5) Terauchi, Y., Nadano, N., Kohno, M. and Nakamoto, Y., *Tribology*, **20**-5 (1987), 248-254.
- (6) 小田・小出・松井・松本, 機論, **54**-501, C (1988), 1135.
- (7) 久松・金沢, 自動車技術, **41**-7 (1987), 722.
- (8) 米谷, 材料, **39**-7 (1987), 837.
- (9) 橋本・白鳥・長嶋, 機論, **55**-520, C (1989), 3034.