

高速回転用歯車の鋼材料・工法開発

小田 敏弘* 加藤 豪* 前田 誠*

抄 録

電動化により歯車が高速回転化し、潤滑環境が厳しくなる(貧潤滑環境)。本開発では、歯面を表面改質し、耐焼付き性・耐ピッチング性を向上させる工法を見出した。更に、歯元疲労強度を確保できる材料成分を設計し、高速回転に対応可能な鋼材料・工法を開発した。

1. まえがき

e-Axleは、車両の空力性能や衝突安全性等の観点から小型化が要求されている。

e-Axleを小型化するには、モータの小型化が必要になる。そのため、高回転化によって小型化によるトルク低下分を補い、出力を確保する。

モータ高速回転化により減速機歯車も高速回転となるため、潤滑が不十分となり貧潤滑環境になることが考えられる。貧潤滑環境では、摺動面の金属接触部が増加するため、焼付きの発生が懸念される。

そこで、既存の耐焼付き手法に対し、安価な歯車の焼付き対策法を開発した。

2. 歯車の耐焼付き性向上の方法

焼付きは金属結合により生じる現象であるため、異種金属層を表面に設け、防止または抑制する。

自動変速機の座金等の部品では安価なガス軟窒化処理を用いて、摺動表面に化合物層を生成させる(Fig. 1)。しかし、ガス軟窒化処理では硬化層は表面に留まるため、内部まで高い硬さが必要な歯車への適用は困難である。

そのため、歯車では高価な二硫化モリブデン処理で対策している(Fig. 2)。

そこで、安価なガス軟窒化処理を活用するため、ガス軟窒化処理前に焼入れ焼戻しで内部硬さを得て、かつガス軟窒化処理後もその硬さが維持できる鋼を開発した。

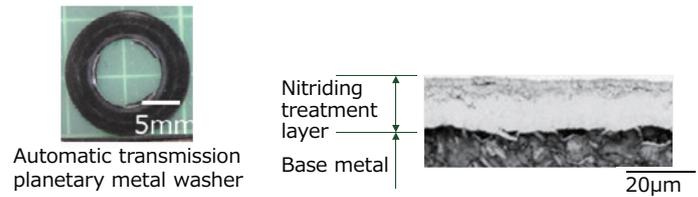


Fig. 1 Surface cross-sectional microstructure after gas nitriding treatment

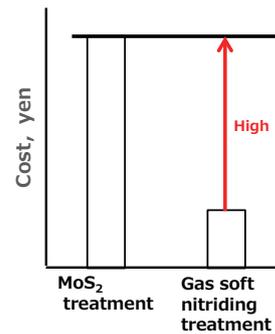


Fig. 2 Cost comparison

3. 材料仕様について

Table 1に今回開発した歯車の材料成分を示す。

炭素量を高くし、焼入れ焼戻し処理で既存仕様の歯車の内部硬さに近づくようにした。さらにモリブデン、バナジウムを添加して、ガス軟窒化処理時の軟化を抑制した。

この成分系の開発鋼を用いTable 2に示す製造工程で歯車を試作した。製造工程の変更規模としては、既存製造条件の範囲内での条件変更のみで対応できた。

* イノベーション技術開発部

なお、比較対象としては、既存の焼付き対策歯車（二硫化モリブデン処理）と対策を行っていない歯車（浸炭焼入れ焼戻し）を用いた。

Table 1 Main material composition (wt%)

	C	Si	Mn	Cr	Mo	V
Development steel	0.34	0.05	0.34	1.12	0.95	0.25
JIS SCr420H	0.21	0.32	0.87	1.18	-	-

Table 2 Manufacturing methods comparison

Method		Manufacturing process					
Seizing countermeasure specifications	Development	Quenching and tempering + Gas soft-nitriding treatment	Forging	Machining	Quenching and tempering	Finish processing	Gas soft nitriding treatment
	Current						Carburizing, quenching and tempering + MoS ₂ treatment
General gear specifications		Carburizing, quenching and tempering	↑	↑	↑	↑	-

4. 歯車の金属組織と硬さ分布

4.1 調査方法

調査は、歯幅中央断面の歯丈中央部とした (Fig. 3)。断面組織はナイタールで腐食後、光学顕微鏡で観察し、断面硬さはマイクロビッカース (HV0.1) にて測定した。

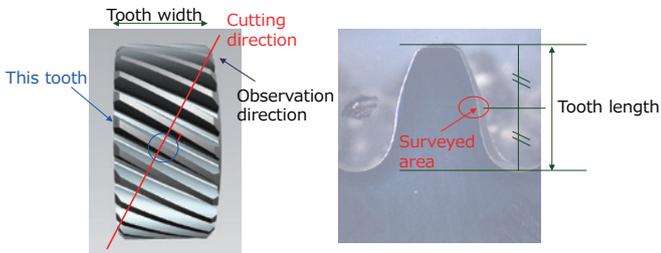


Fig. 3 Gear evaluation cross section

4.2 断面組織, 断面硬さの結果

Fig. 4に断面組織, Fig. 5に断面硬さ分布を示す。表層に化合物層の生成が認められ、かつ目標硬さ以上の硬さが得られた。

なお、目標硬さは歯車の入力より推定した値を用いている。

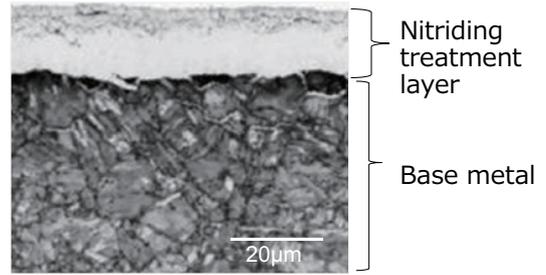


Fig. 4 Cross sectional microstructure

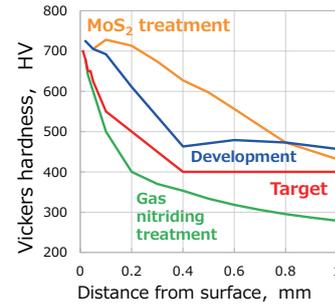


Fig. 5 Cross-sectional hardness distribution

5. 焼付き評価

5.1 評価条件

試作した歯車で焼付き評価を実施した。条件をTable 3, 4に示す。評価はEV車の高速走行（低トルク）と発進（高トルク）を模擬した2水準のトルクで回転数を変更し、焼付き有無を外観観察により判断した。今後想定される高速回転化は、3万回以上になると想定される。

Table 3 Low torque evaluation experimental conditions (high speed driving simulation)

Number of rotations, rpm	4,000	5,000	...	10,000
Torque, Nm	202	202	...	202

↑ ↑ ↑ ↑
Observation Observation Observation

Table 4 High torque evaluation experimental conditions (simulating starting)

Number of rotations, rpm	1,000	2,000	...	7,000
Torque, Nm	625	625	...	625

↑ ↑ ↑ ↑
Observation Observation Observation

今回は、試験機の関係で実際に3万回転の入力を与えることができなかった。そこで、評価油温を上げることで油膜形成が厳しい潤滑条件とし、現行EV車の2倍以上の回転数(3万回転)相当以上で耐焼付き性を評価している(Fig. 6)。

また、各条件における評価時間は3分である。

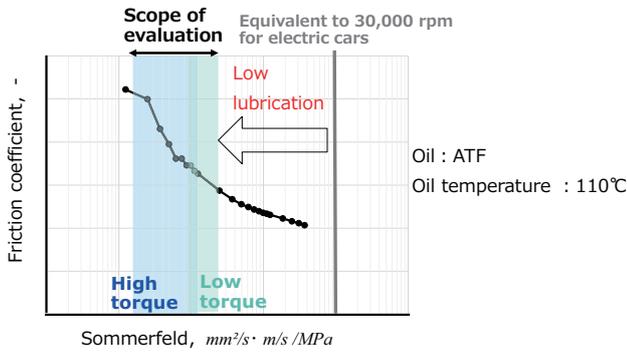


Fig. 6 Stribeck curve

5.2 評価結果

(1)低トルク条件

試験機の限界回転数まで評価したが、開発仕様と二硫化モリブデン処理は焼付かず、浸炭焼入れ焼戻しに対し約2倍以上の耐焼付き性であった(Fig. 7, 8)。

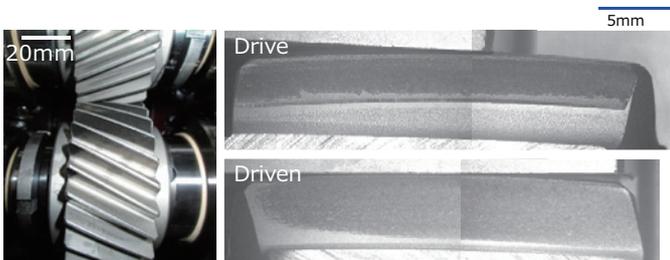


Fig. 7 Development specifications external view (after low torque evaluation test)

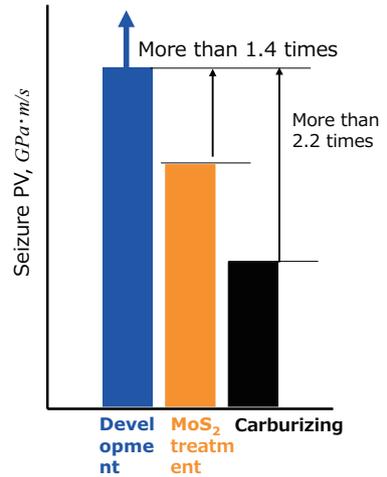


Fig. 8 Endurance test results (low torque test)

(2)高トルク条件

開発仕様は焼付きがなく、浸炭焼入れ焼戻しに対し2.2倍以上の耐焼付き性が得られ、二硫化モリブデン処理に対し1.4倍以上の耐焼付き性が得られた(Fig. 9, 10)。

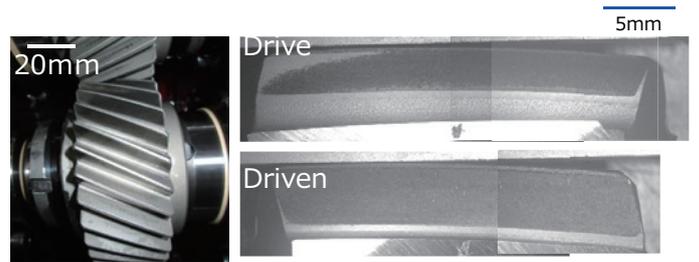


Fig. 9 Development specifications external view (after high torque evaluation test)

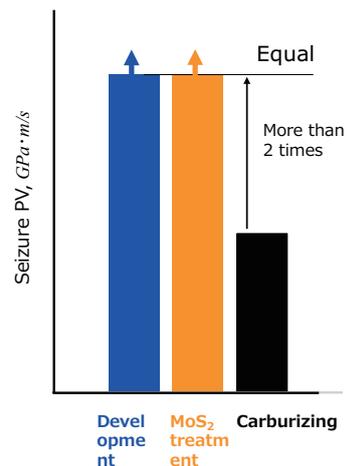


Fig. 10 Endurance test results (high torque test)

6. 考察

高トルク条件での評価では、開発仕様は二硫化モリブデン処理に対し1.4倍以上の結果が得られ、低トルク条件での評価では両者ともに焼付くことなく終了した。

そこで、有意差が確認できなかった低トルク条件の試験後の歯面を確認したところ、被膜硬さが硬質な開発仕様は約4 μm の摩耗量であるが、軟質な二硫化モリブデン処理は約16 μm と4倍程度大きいことがわかった (Fig. 11, 12)。

そのため、開発仕様は二硫化モリブデン処理に比べ、被膜維持に必要な耐摩耗性が高く、低トルク条件でも耐焼付き性に優れていると考える。

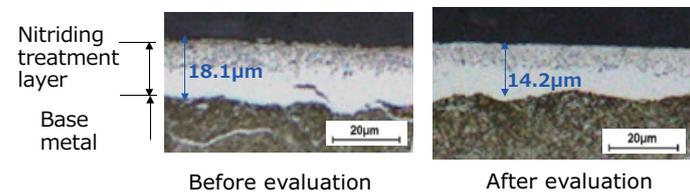


Fig. 11 Film thickness before and after evaluation tests of development specifications

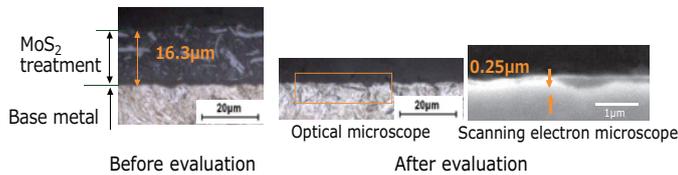


Fig. 12 Film thickness before and after evaluation tests of MoS₂ treatment

7. まとめ

モータ高速回転化による歯車の耐焼付き性が向上できる材料工法を開発した。

高合金鋼と焼入れ焼戻し、ガス軟窒化処理を組み合わせ、既存対策仕様である二硫化モリブデン処理に比べ、高い焼付き性が確保できた。

また、既存製造条件の範囲内での条件変更のみで対応できたので、二硫化モリブデン処理の歯車に比べ安価にすることができた。

8. 参考文献

小田敏弘, 加藤豪, 玉井智也, 山崎歩見: 貧潤滑環境下での耐力を向上させる歯車材料・工法の開発, 中部支部研究発表会2023年人テク名古屋

■ 著者 ■



小田 敏弘



加藤 豪



前田 誠