技術資料

Technical Paper

特殊環境用軸受鋼の開発

木南俊哉^{*} , 木村利光^{*}

Development of Bearing Steels for Special Environment

Toshiya Kinami , and Toshimitsu Kimura

Synopsis

Recent improvements in the quality of steels have meant that rolling bearings are largely free from materials defects. Therefore, damage generated during the operating life of the component becomes the main source of failure. This damage is frequently caused by overheating at a higher speed operation or by the overrolling of debris particles in the lubricant.

A new bearing steel, named STJ2, for high temperature service was developed in the view of suppressing rolling contact fatigue phenomenon, which is accelerated by the heat occur at raceway. STJ2 showed a longer life than conventional JIS-SUJ2 steel in a bearing test at 473K, and have been applied to spherical roller bearings produced by NTN Corp.

Another bearing grade for contaminated lubricant service was designed with the control of retained austenite in a steel. Adequate amount of retained austenite that prolonged the rolling contact fatigue life under a contaminated lubricant was obtained by the addition of manganese more than 2 mass%. This new steel has just been begun to introduce to domestic and foreign bearing manufacturers.

1 . はじめに

自動車, 産業用機械, 家電・情報機器などの機械装置に組み込まれる軸受には, 軽量・コンパクト化だけでなく, 過酷な使用環境に対応できる軸受機能の向上が求められている。このニーズを満足するには, 材料, 熱処理, 形状やサイズを最適化し, さらに使用ユーザーと共同で周辺部品とのユニット化を図ることが必要である。

大同特殊鋼(以下, 弊社と呼ぶ)では, とくに過酷な環境で使用される軸受向けの材料と, それに適した熱処理の開発に取り組んできた。ここでは, 軸受メーカーと共同で開発し, 実用化した高温軸受用鋼と, 弊社独自に開発した耐異物軸受用鋼について紹介する。

2 . 高温軸受用鋼の開発

2.1 背景と合金設計の考え方

自動車エンジンの高出力化, 産業機械の高速化や密封化に伴い, 軸受の使用環境温度が上昇し, 473 ~ 523K で性能を保持する軸受の開発が望まれていた。この温度域で,

焼入・焼戻しを施した SUJ2 を使用すると, 硬さが低下して転動寿命特性が劣化してしまう。一方, ジェットエンジン等に用いられる析出硬化型合金鋼; M50 は, 同温度域で十分な転動寿命を有しているものの, Cr, Mo, V 等の合金元素を 10% 程度も含むゆえに材料コストが高く, 熱処理も複雑であり, 汎用性に欠けている。そこで, 高価な合金元素の添加を最小限に抑え, 熱処理性と加工性をも考慮した高温軸受用鋼の開発を目指した。

高温での軟化を防止するには, 焼入れ硬さを高めておくこと, 焼戻し軟化抵抗を高めることが有効である。まず, 焼入れ硬さと焼戻し硬さに及ぼす合金元素の影響を調査して, 焼入れ硬さの上昇のためには C を, 焼戻し軟化抵抗の改善のために Si を利用することにした。

さらに, 転動疲労試験機を改造して高温下での転動寿命と合金元素の関係を調べ, 転動疲労時の転走面下の組織変化を詳細に観察した。Fig.1 に転動疲労における典型的な組織変化の一例を示す。これにより, 疲労破壊の過程が, せん断応力の繰り返し負荷による転走面下で特定の方向と長さに発達するすべり線の生成, すべり線に沿った白色

2003 年 11 月 12 日 受付

^{*} 大同特殊鋼(株)技術開発研究所 (Research & Development Lab., Daido Steel Co., Ltd.)

のバンド状組織; ホワイトバンドの形成, ホワイトバンド両端からの微小き裂の発生 (Fig.1 A,B 部) からなることがわかった。また, Ni の添加が高温転動疲労時のホワイトバンドの発生を抑制し, 転動寿命を延命させることも判明した¹⁾。これは Ni が局所すべりあるいは C 拡散を抑制し, ホワイトバンドへの組織変化を遅延させる効果があるためと思われる。

以上から, 比較の SUJ2 に対し, C と Si を増量して高温での硬さ低下を防止し, Ni 添加による転動特性の維持を図った材料を高温軸受用鋼として選定した。この本開発鋼を STJ2 と称し, NTN ㈱と共同で各種の強度評価を行った。

Fig.1. Typical white bands under contact surface of thrust-type specimen¹⁾.

2.2 STJ2 の性能

Fig.2 に STJ2 の焼入れ硬さと焼入焼戻し硬さにおよぼす焼戻し温度の影響を SUJ2 と比較して示す。STJ2 は SUJ2 に比べ C 量を高めた効果により焼入れ硬さが高く, このため低温焼戻しでは高硬度である。また, 473K を超える高温焼戻しでは主に Si 添加の効果により硬さが高く, 高温焼戻しを施しても軸受として使用可能な硬さを維持できる。

Fig.3 に STJ2 の焼入れ焼戻し材の高温硬さを SUJ2 と比較して示す。STJ2 は常温から高温域までの広い温度域において SUJ2 より高い高温硬さを有し, 耐熱性にも優れる。

Table 1 に STJ2 の常温および 473K における試験片および軸受での転動疲労寿命を SUJ2 と比較して示す²⁾。温度 473K の試験片での試験寿命は SUJ2 に比べて 33 倍以上の長寿命であり, 高温軸受用鋼として優れた寿命特性を有している。一方, 常温での試験でも SUJ2 に比べて長寿命であり, STJ2 が広い温度領域で使用可能な汎用性の高い軸受用鋼であることがわかる。

現在, STJ2 は高温環境下での長寿命化要求の強い自動

調心ころ軸受に実用化され, さらに常温での寿命特性にも優れることから, 従来の SUJ2 に置き換わりつつある²⁾。今後, ターボチャージャー用軸受等の高温用途や一般軸受での適用の拡大が期待される。

Fig.2. Relation between tempering temperature and hardness.

Fig.3. Relation between testing temperature and high temperature hardness.

Table 1. Rolling contact fatigue life test results of specimen and bearing at room temperature and 473K²⁾.

Steel	L ₁₀ at room temperature		L ₁₀ at 473 K	
	Specimen (x10 ⁷ cycle)	Bearing (h)	Specimen (x10 ⁵ cycle)	Bearing (h)
STJ2	78.2	423	> 300	1206
SUJ2	6.25	122	9	81

3. 耐異物軸受用鋼の開発

3.1 背景と合金設計の考え方

自動車のトランスミッションやディファレンシャルに用いられる軸受では、油中に異物（スラッジ、切り粉）が混入することがある。この異物が転走面にかみ込まれると、圧痕を生じて転走面の早期剥離を招くため、耐異物軸受用鋼の開発が望まれていた。

弊社では、まず、異物混入環境下での転動疲労の再現試験を検討した。Fig.4 に示したようにスラスト転動疲労試験ハウジング内面を円筒状から曲面状に、かつ試験片上端面がハウジング内側底面と一致するように改造し、混入異物が試験中十分攪拌され、試験早期に試験片転走面に異物による圧痕が生成するようにし、圧痕を起点として圧痕のころがり方向側に初期き裂が発生し、フレーキング剥離にいたるといった軸受で観察されている破壊を再現することができた。さらに、混入異物の硬さ、粒度および油浴中の混入量を適正化した。Fig.5 は本試験によって得られた圧痕、初期き裂、フレーキング剥離を示す。

異物混入環境下での転動疲労は圧痕を起点としたフ

Fig.4. Schematic illustration of improved thrust type rolling contact fatigue testing machine for contaminated lubrication.

Fig.5. (a)Crack initiation and (b)flaking from surface dent.

レーキング剥離で可まるため、寿命の改善には、圧痕の生成抑制、圧痕起因の応力集中の緩和、圧痕からのき裂発生抑制等が効果があると考えられる。圧痕生成の抑制には表面硬さを高めること、圧痕からのき裂発生抑制にはマトリックスの靱性を高めることが有効である。

一方、圧痕起因の応力集中の緩和には表面での残留オーステナイト量を高めることが有効である。これは、生成した圧痕の縁形状が、応力集中により高くなった応力による繰り返し負荷により、残留オーステナイトがマルテンサイトに変態し硬化するとともに、圧痕縁形状が応力集中が緩和する方向に変形するためと考えられる³⁾。

本試験による検討の結果、異物混入環境下での寿命改善には、表面での残留オーステナイト量を高めることが、表面硬さあるいはマトリックスの靱性を高めることよりも有効であった。

Fig.6 に示したように残留オーステナイト量と異物混入条件下の転動寿命は高い相関が認められる。耐異物軸受用鋼として長寿命化特性を得るためには表面硬化処理（特に浸炭窒化処理が有効）した 20% 以上の残留オーステナイトが必要であり、通常鋼の焼入れ焼戻し処理では高々 10% 程度の残留オーステナイト量しか得られない。

そこで、通常の焼入れ焼戻し処理での残留オーステナイト量を高めることにより、浸炭窒化処理と同等の異物転動疲労寿命を有する耐異物軸受用鋼の開発を行った。

Fig.6. Relation between retained austenite and fatigue life L_{10} under contaminated lubrication.

3.2 焼入れ焼戻し鋼の開発

通常の焼入れ焼戻し処理での焼入れ温度を高めると炭化物のマトリックスへの固溶がすすみ、マトリックスのC濃度が上がるため、 M_s 点(マルテンサイト変態開始温度)が低下し、残留オーステナイト量が増加する。また、焼入れ時の最低到達温度が高いほど残留オーステナイト量は増加する。

しかし、通常の熱処理条件を大幅に変えることなく残留オーステナイト量を高めるためには、 M_s 点を下げる合金元素添加が有効である。ここで、同じ合金添加量で M_s 点を下げる効果はC以外ではMnが最も大きく、Ni, Cr, Moの約2倍の効果があるため⁴⁾、SUJ2のMnを増量した鋼を開発した。

Fig.7はSUJ2のMnを増量した材料において通常の焼入れ焼戻し処理での、Mn添加量と残留オーステナイト量の関係を示す。Mn量とともに残留オーステナイト量が増加し、Mn添加量が2%を超えると通常の焼入れ焼戻し処理でも20%以上の残留オーステナイトが生成している。

Fig.7. Effect of manganese content on amount of retained austenite in through hardened condition.

Table 2は2%を超えるMnを添加した耐異物軸受用鋼DCJ2の焼入れ焼戻し処理での耐異物転動疲労寿命と清浄油転動疲労寿命をSUJ2と比較して示している。DCJ2はSUJ2と比べて残留オーステナイト量が高く、異物混入条件下、清浄油中ともに優れた転動疲労寿命を示す。

DCJ2はFig.6に示したように、浸炭窒化処理鋼なみの優れた耐異物寿命を有することがわかる。

4. おわりに

高温軸受鋼STJ2と耐異物軸受鋼の開発の考え方および開発鋼の基礎特性を紹介した。すでに、両鋼の表面硬化処理鋼への展開も実施した。Si, Ni添加の耐熱浸炭軸受鋼をNTN(株)と共同開発し、実用化した。また、浸炭窒化処理により優れた寿命特性を有するMn添加の耐異物用焼戻し鋼を開発し、日米欧の軸受メーカーに紹介を開始している。

軸受鋼はその大半がSUJ2であり特殊環境用には浸炭窒化等の熱処理で対応することも多い。しかし、合金元素の適正化による特性改善の余地は十分に残されており、今後も特殊環境用に特性を改善した各種軸受鋼を開発していきたい。

(文 献)

- 1) 木南俊哉, 紅林豊: 電気製鋼, **73**(2002), 23.
- 2) 田中広政, 藤井幸生, 前田喜久男: NTN TECHNICAL REVIEW, **68**(2000), 51.
- 3) 村上保夫: NSK Technical Journal, **673**(2002), 3.
- 4) たとえば 村井暢宏, 津村輝隆: 鉄と鋼, **84**(1998), 48.

Table 2. Rolling contact fatigue life test results under contaminated and clean lubrications.

Specimen			Contaminated lubrication		Clean lubrication	
Steel	Hardness HRC	Retained %	L ₁₀ (x10 ⁵ cycle)	L ₅₀ (x10 ⁵ cycle)	L ₁₀ (x10 ⁶ cycle)	L ₅₀ (x10 ⁶ cycle)
DCJ2	58.9	21.1	7.3	15.9	55.7	119.3
SUJ2	63.2	8.4	4.1	10.9	13.1	32.5