

転がり軸受の白色組織はく離におよぼす炭素量の影響

Effect of Carbon Contents in White Structure Flaking of Rolling Bearing

NSK (正) *吉村 聡馬 NSK (正) 名取 理嗣 NSK (正) 小俣 弘樹

Soma Yoshimura*, Masahide Natori*, Hiroki Komata*

*NSK Ltd.

1. 緒言

転がり軸受のはく離損傷の一つに、軸受内部に白色組織変化を伴うはく離がある（以下、白色組織はく離）。白色組織はく離は極めて早期に発生することが知られており、その対策が必要不可欠である。白色組織はく離は、潤滑剤の分解により発生した水素が軸受内部に侵入し、局所的な組織変化¹⁾やき裂の発生・進展を促進する²⁾ことで生じるとされている。そのため白色組織はく離を抑制する材料面での対策として、合金元素を添加した材料に浸炭処理を施すことで、鋼中の水素拡散速度の低下および表層の圧縮残留応力付与の効果によって白色組織の形成を抑制する手法がとられている。一方で、この手法は製造コストおよび地球環境負荷の観点から必ずしも最適解ではなく、浸炭処理を利用することなく合金成分の添加を極力抑えた長寿命材料開発が求められている。そこで、本研究では、軸受鋼 JIS-SUJ2 をベースに炭素および合金成分を変化させた材料に対して白色組織はく離再現試験を行い、白色組織およびき裂の発生過程に注目して、白色組織はく離寿命に及ぼす炭素量および合金成分の影響を調査した。

2. 供試材と実験方法

2.1 供試材

Table 1 に本研究に使用した供試材の化学成分を示す。尚、供試材は山陽特殊製鋼株式会社より提供されたものである。JIS-SUJ2 については、840℃と 950℃の 2 水準の焼入れ温度で熱処理を行い、いずれも 170℃で焼戻しを行った（以下、それぞれ SUJ2-Q840 および SUJ2-Q950）。その他の供試材については JIS-SUJ2 と同等の硬さ $HV \approx 690 \sim 750$ となるように熱処理条件を調整した。

2.2 実験方法

転がり疲れ試験には、供試材から作製したラジアル深溝玉軸受 JIS-6206 を用いた。潤滑剤として鋼中に水素が侵入しやすい特殊潤滑油を用い、白色組織はく離の再現を試みた。ラジアル荷重は 8.9 kN とし、1000 hr 以上ではく離が発生しない場合は試験を中断した。試験後に断面を切断し、光学顕微鏡、走査型電子顕微鏡 (SEM) および電子線後方散乱回折法 (EBSD) を用いて材料組織の観察を行った。

3. 実験結果および考察

Fig. 1 に、寿命試験から得られたワイブルプロットを示す。試験軸受の軌道面ははく離以外の要因で試験を中断したデータや打ち切り時間に到達した試験を中断したデータには矢印を付けてプロットしている。ここでは、寿命比較のためこれらの中断した試験データも破損時間とみなして累積破損時間を計算している。 L_{50} （累積破損確率が 50%となる寿命）を比較すると、SUJ2 においては焼入れ温度による寿命の違いは認められなかった。JIS-SUJ2 と 1C-3Cr では 1C-3Cr のほうがわずかに長寿命であり、クロムの添加によって長寿化したことが示唆される。一方で、0.58C-3Cr および 0.55C-1Cr の L_{50} は SUJ2 と 1C-3Cr の約 4 倍以上であった。0.58C-3Cr および 0.55C-1Cr の L_{50} はいずれも 1000 時間を超えており、試験軸受の半数以上ではく離せず試験を打ち切る結果となった。すなわち、鋼中の炭素量の低減に伴い白色組織はく離寿命が長寿化することが示唆された。

Fig. 2 に、試験終了後の軸受断面の組織観察結果を示す。(a) SUJ2-Q840 では断面にき裂を伴った白色組織が観察され、白色組織はく離によって軸受が破損したことがわかる。また、(b) 1C-3Cr でははく離部に白色組織は残っていないが、断面の一部にき裂を伴った白色組織が観察され、白色組織はく離が発生することが示唆される。一方で、(c) 0.58C-3Cr においては断面に白色組織は観察されなかった。したがって、0.58C-3Cr では、炭素量を低減することにより初期き裂および白色組織変化が発生しにくくなった結果、SUJ2 や 1C-3Cr よりも長寿命になったと考えられる。

Table 1 Chemical composition in steels (mass%)

Material	C	Si	Mn	Cr	Mo
SUJ2-Q840	1.00	0.25	0.35	1.50	-
SUJ2-Q950	1.00	0.25	0.35	1.50	-
1.03C-3Cr	1.03	0.46	0.80	3.04	0.35
0.58C-3Cr	0.58	0.45	0.79	2.96	0.36
0.55C-1Cr	0.55	0.45	0.80	1.01	0.33

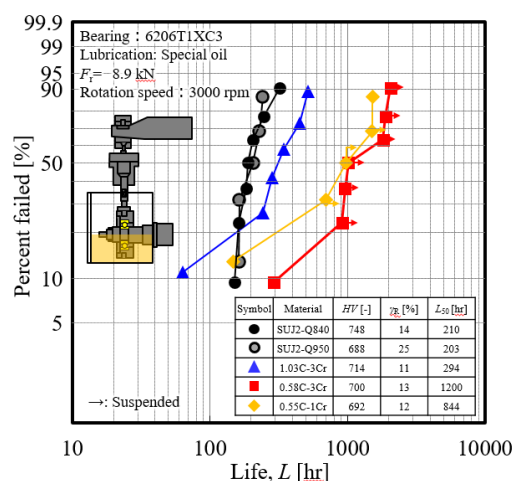


Fig. 1 The results of the rolling contact fatigue tests

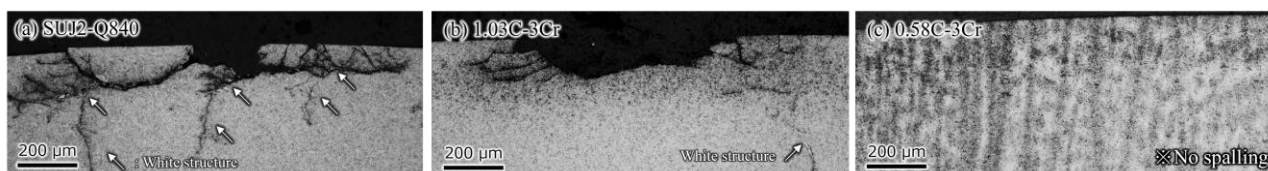


Fig. 2 Optical microscope images after testing

白色組織はく離の起点を調査するために、SUJ2-Q950 の L_{50} 寿命の 15%程度となる 32 hr で試験を中断し、断面観察を行った。Fig. 3 (a) (c) に初期き裂の SEM 像、(b) (d)に(a) (c)と同一視野を EBSD によって観察した結晶方位マップを示す。Fig. 3 (a) (b)で観察されるき裂は bcc 鉄のすべり面の一つである $\{011\}$ 面に沿って発生している。このき裂の周囲に白色組織は観察されなかった。一方で、Fig. 3 (c) (d)で観察されるき裂は旧オーステナイト粒界に沿って発生しており、き裂先端近傍に白色組織が発生していた。また、この初期き裂は周囲に比べて粗大なプレート状マルテンサイトブロックに隣接して発生している。以上の観察結果から、白色組織はく離はすべり面や旧オーステナイト粒界に沿った粗大ブロックに沿って微小なき裂が発生し、その進展過程において二次的に白色組織変化が生じていることが明らかとなった。

ここでは、鋼中の炭素量の違いによって生じるき裂発生挙動の差に注目して、0.58C-3Cr および 0.55C-1Cr が SUJ2 よりも長寿命化した要因を考察する。Fukui ら³⁾は、マルテンサイト変態過程における格子変形によって、晶癖面と平行な方向の引張応力がブロック内部に残留していることを示している。このような格子変形は炭素量が多くなるほど大きくなることが予想されるため、本研究においても高炭素鋼では、晶癖面方向に局所的な引張残留応力が発生していた可能性がある。さらに、マルテンサイト中の旧オーステナイト粒界は水素の優先的なトラップサイトの一つ⁴⁾であり、粒界に偏析した水素によって粒界強度が低下する⁵⁾ことも知られている。これらの観点から高炭素鋼である SUJ2 や 1C-3Cr では、旧オーステナイト粒界における局所的な残留引張応力と水素集積による粒界強度の低下が重畳することで、白色組織はく離の起点となるき裂の発生が促進された可能性が考えられる。一方で、鋼中の炭素量が少ないほど粗大なブロックの発生頻度が低下すること⁶⁾が報告されている。すなわち、0.58C-3Cr や 0.55C-1Cr などの中炭素鋼では SUJ2 や 1C-3Cr などの高炭素鋼よりも炭素量が少ないので、き裂の発生起点となる粗大なブロックの発生頻度が減少したことが推測される。また、固溶炭素量も少ないことで、局所的な引張残留応力も小さくなった可能性も考えられる。以上のことから、旧オーステナイト粒界に沿った初期き裂が発生しづらくなり、高炭素鋼よりも白色組織はく離寿命が長寿命化したと考えられる。

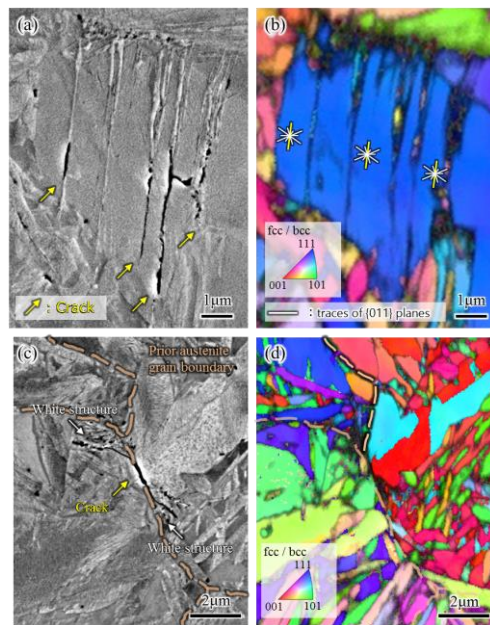


Fig. 3 (a)(c)SEM image and (b)(d)orientation map around crack initiation site of SUJ2-Q950.

4. 結言

水素侵入環境下における転がり軸受の白色組織はく離の発生挙動に及ぼす炭素量およびクロム量の影響を調査した結果、JIS-SUJ2 では白色組織はく離が発生する条件でも中炭素鋼では発生しておらず、4 倍以上の長寿命を示した。また、中炭素鋼では白色組織はく離の起点になる初期き裂が観察されなかった。炭素量が少なくなったことで、初期き裂の発生が抑制されたことが長寿命化の要因と考えられる。

文献

- 1) 宇山：転がり軸受に及ぼす水素の影響，トライボロジスト，60，10 (2015) 658.
- 2) 高崎・祐谷・根石・小坂・崎山・大村・河野，浸炭軸受鋼の転動疲労における白色組織変化を伴うはく離プロセス，鉄と鋼，110，(2024)，1150.
- 3) D. Fukui, N. Nakada & S. Onaka: Internal residual stress originated from Bain strain and its effect on hardness in Fe–Ni martensite, *Acta Materialia*, 196, (2020), 660.
- 4) Y. Momotani, A. Shibata, T. Yonemura, Y. Bai & N. Tsuji: Effect of initial dislocation density on hydrogen accumulation behavior in martensitic steel, *Scripta Materialia*, 178, (2020), 318.
- 5) S Wang, ML Martin, IM Robertson & P Sofronis, Effect of hydrogen environment on the separation of Fe grain boundaries, *Acta Materialia*, 107, (2016), 279.
- 6) A. Stormvinter, G. Miyamoto, T. Furuhashi, P. Hedstrom & A. Borgenstam: Effect of carbon content on variant pairing of martensite in Fe–C alloys, *Acta Materialia*, 60, (2012), 7265.