

潤滑油からの水素侵入を伴う転動疲労における白色組織はく離メカニズム Mechanism of white structure flaking under rolling contact fatigue with hydrogen absorption from lubricant

日本製鉄株式会社（正）*高崎 大裕 （非）崎山 裕嗣 （非）大村 朋彦 （正）根石 豊 （非）河野 佳織

Daisuke Takazaki*, Yuji Sakiyama*, Tomohiko Omura*, Yutaka Neishi*, Kaori Kawano*

*Nippon Steel Corporation

1. 緒言

軸受では、白色組織と呼ばれる組織変化を伴うはく離が生じることがある。白色組織はく離は、自動車の電装部品¹⁾や風力発電のギヤボックス²⁾などに使用される軸受で報告されており、これらの長期信頼性の向上や設計指針の確立のためには、白色組織はく離のメカニズム解明が必要である。

白色組織はく離に対する影響因子の一つに水素がある。軸受の使用中に、潤滑油から水素原子の分離反応³⁾が生じ、軌道輪や転動体に水素が侵入し、白色組織はく離が引き起こされる。転がり摩耗により潤滑油からの水素原子の分離反応が促進され、水素原子が軸受鋼内部に侵入し、白色組織はく離が引き起こされると理解されている³⁾。一方、白色組織はく離のプロセスについては、白色組織や針状組織の形成、き裂の発生や進展など複数の素過程があり、各素過程の詳細や力学的支配因子は十分に理解されていない。そこで本研究では、水素侵入を伴う転動疲労試験を実施し、白色組織はく離のプロセスを調査した。

2. 実験方法

2.1 供試材

供試材には SAE5120 (0.19C-0.21Si-0.85Mn-0.85Cr mass%) の浸炭鋼を用いた。真空炉にてインゴットを溶製し、直径 35 mm の丸棒に熱間鍛造し、焼ならし処理 (925 °C × 60 min) 後、試験部直径 26 mm の二円筒転がり疲労試験用の丸棒試験片を採取した。その後、試験片表面炭素濃度が 0.80 mass% になるようにガス浸炭焼入れし、180°C で焼戻しを行うことで、低温焼戻しマルテンサイト組織の試験片を作製した。試験片の炭素濃度およびビッカース硬さの深さ方向分布を Fig. 1 に示す。試験片表面のビッカース硬さは 780HV 程度であり、全硬化深さは 1.5 mm 程度である。

2.2 転動疲労試験方法

白色組織はく離を再現するため、Fig. 2 に示す二円筒転がり疲労試験を実施した。直径 26 mm の小ローラが試験片である。相手材の大ローラには、焼入焼戻しを施した JIS-SUJ2 を用いた。試験片に対して相手材を接触面圧 2600 MPa で押付けながら、試験片と相手材をそれぞれ回転させることで、転動疲労試験を実施した。潤滑油には市販のオートマチックトランスミッション油を用い、試験片と相手材との接触部に 90 °C の潤滑油を噴付けた。また、潤滑油からの水素原子の分離反応を促進させるため、試験片の周速を 2.0 m/s、相手材の周速を 2.8 m/s で回転させることで、すべりを伴う転動疲労試験を実施した。

2.3 応力解析

試験片に負荷される応力分布の解析には、境界要素法に基づく接触解析ソフト TED/CPA (株式会社トラ研製)⁴⁾を用いた。解析における座標系は、Fig. 2 に示すように、接触部の幅方向を x 軸、試験片の回転方向を y 軸、試験片の深さ方向を z 軸として、x = 0 mm における yz 平面の応力解析を実施した。試験片と相手材はどちらも弾性体とし、ヤング率 206 GPa、ポアソン比 0.3 とした。試験片と相手材の摩擦係数は、過去の研究⁵⁾を参考に 0.07 とした。

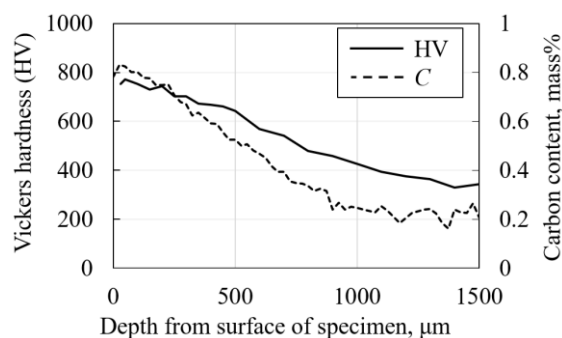


Fig. 1 Profiles of the Vickers hardness and carbon content of the specimen (carburized SAE5120).

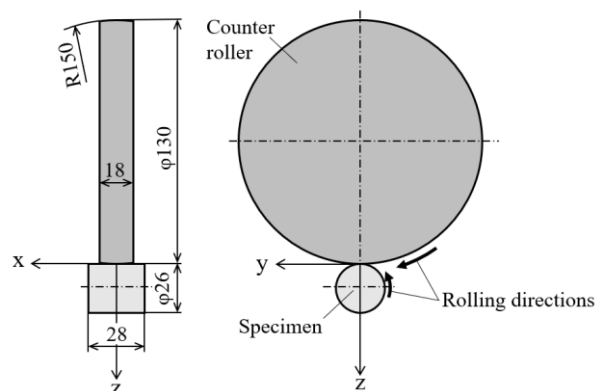


Fig. 2 Schematic of the rolling contact fatigue (RCF) test. (Dimensions are in mm)

3. 結果・考察

3.1 転動疲労試験後の試験片断面観察

接触面圧 2600 MPa で 1100 万回および 5000 万回の転動疲労試験後、試験片断面の光学顕微鏡による観察結果を Fig 3 に示す。転動回数 1100 万回では、表面から 100~600 μm 程度の深さに針状組織の形成が観察され、き裂や白色組織は観察されなかった。転動回数 5000 万回では、針状組織に加え、Fig. 4 に示すように、白色組織を伴うき裂が観察された。すなわち、き裂や白色組織の形成に先立って針状組織が形成することが確認された。また、き裂は、Fig. 4(a) に示すように、旧オーステナイト粒界に沿うものが複数観察された。このことからき裂の発生起点は旧オーステナイト粒界であると考えられる。なお、Fig. 4(a) に示すような、長さが 10 μm 程度以下のき裂の周りには白色組織は観察されなかった。一方、Fig. 4 (b) に示すように、き裂が成長すると、その擦合わせ面近傍に白色組織が形成された。つまり、旧オーステナイト粒界でき裂が発生した後、そのき裂が進展する過程で、き裂の擦合わせ面近傍に白色組織が形成すると考えられる。加えて、旧オーステナイト粒界き裂は、表面から 70~100 μm 程度の深さに多く観察された。これは、針状組織の形成深さに比べて浅い。このことから、針状組織はき裂発生や白色組織形成に対して直接的な関係が無く、むしろ旧オーステナイト粒界で発生したき裂が白色組織はく離の起点であると考えられる。

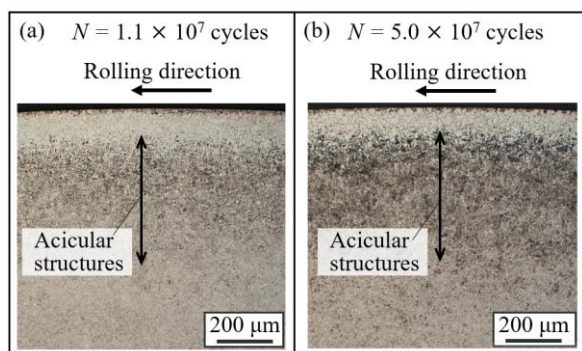


Fig. 3. Optical micrographs of acicular structures and cracks observed in a cross-section of the specimen.

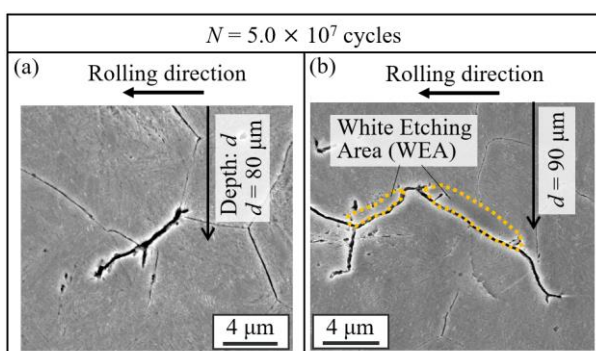


Fig. 4 SEM micrographs of cracks and white etching area observed in a cross-section of the specimen.

3.2 応力解析

Fig. 5 は、上記実験と同じ接触面圧において、試験片に転動疲労 1 サイクル負荷されたときに、試験片に負荷される yz 方向のせん断応力範囲 $\Delta\tau_{yz}$ の深さ方向分布である。同図には、Fig. 3 および Fig. 4 で観察された針状組織およびき裂の形成深さを併せて示している。 $\Delta\tau_{yz}$ は、深さ 240 μm 程度で最大値を示した。これは、針状組織の形成深さと一致する。すなわち、針状組織形成の力学的支配因子はせん断応力であると考えられる。一方、き裂が発生しやすい深さ (70~100 μm) は、 $\Delta\tau_{yz}$ の最大深さと一致しなかった。このことから、き裂発生と針状組織形成とは力学的支配因子が異なっており、き裂発生にはせん断応力以外の因子が支配的であると考えられる。

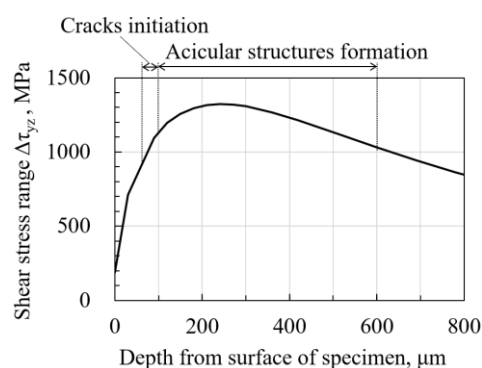


Fig. 5 Distribution of the shear stress range.

4. 結言

軸受の水素侵入環境下で生じる白色組織はく離のメカニズムを解明するため、SAE5120 浸炭鋼を用いて、すべりを伴う 2 円筒転がり疲労試験および応力解析を実施した。得られた結果を以下に示す。

- ・ 接触面圧 2600 MPa で 5000 万回の転動疲労試験により白色組織を伴うき裂が形成された。
- ・ き裂の発生起点は旧オーステナイト粒界であった。旧オーステナイト粒界で発生したき裂が進展する過程で、き裂の擦合わせ面に白色組織が形成すると考えられる。
- ・ 旧オーステナイト粒界き裂の発生深さはせん断応力のピークよりも浅い位置であった。このことから、き裂発生にはせん断応力以外の因子が作用すると考えられる。

文献

- 1) K. Tamada & H. Tanaka: Occurrence of brittle flaking on bearings used for automotive electrical instruments and auxiliary devices, *Wear*, 199, 2 (1996), 245.
- 2) M. -H. Evans, A. D. Richardson, L. Wang & R. J. K. Wood: Effect of hydrogen on butterfly and white etching crack (WEC) formation under rolling contact fatigue (RCF), *Wear*, 306, (2013), 226.
- 3) 江波・山田・小俣：転がりすべり接触下における潤滑剤からの水素発生，*トライボロジスト*，68，12 (2023) 868.
- 4) 梶井：摩擦がある場合の三次元弾性接触問題の専用境界要素法による解析，57，544 (1991) 3010.
- 5) 木南・中村：ローラーピッチング試験の接触応力に関する有限要素法解析，69，1 (1998) 41.