

残留オーステナイトによる転動疲労寿命向上メカニズムに関する考察

A Study on the Mechanism of Rolling Contact Fatigue Life Improvement by Retained Austenite

(株) ジェイテクト (正) *金谷 康平

Kohei Kanetani

JTEKT Corporation

1. はじめに

近年、地球環境の保護に対する関心の高まりから、機械装置の小型・軽量化や高効率化が以前にも増して要求されており、使用される転がり軸受の小型化が必要になってきている。軸受を小型化するためには、材料の疲労強度を高めて転動疲労寿命を向上させることが有効である。疲労強度を向上させる方策として、組織制御によるマトリクス強化が知られている。焼入れ焼戻しした鉄鋼材料の組織には、焼戻しマルテンサイト以外に残留オーステナイト (γ) も含まれており、この残留 γ が転がり接触中に加工誘起マルテンサイト変態することで組織を強化することが報告されている¹⁾。しかしながら、転がり接触の場合に生成する加工誘起マルテンサイトの組織的な特徴は十分に調査されておらず、組織強化のメカニズムは明らかにされていない。本報では、転がり接触において生成する加工誘起マルテンサイトの組織的特徴を明らかにし、転動疲労寿命の向上メカニズムを考察する。

2. 実験方法

2.1 試料

供試材には SAE4320 (0.20C-0.55Mn-1.70Ni-0.53Cr-0.21Mo) を用いた。棒鋼から円柱の試験片形状に切削し、ガス浸炭焼入れ焼戻しを施した後、表面粗さが Ra0.08 となるように外径 20 mm、長さ 36 mm に仕上げ加工した。表面の熱処理性状は、硬さ 720 HV、残留 γ 量 39 vol.% である。

2.2 転動疲労試験

円柱試料と SUJ2 製鋼球（直径 31.75 mm）を、最大ヘルツ面圧 5.8 GPa、応力繰り返し数 285 s⁻¹、油潤滑 (ISO-VG100, 80 °C) で転がり接触させた。本試験で評価した試料の転動疲労寿命 (L_{10}) は 1.2×10^8 回である。なお、本試料に対して浸炭焼入れ後に種々の温度のサブゼロ処理を追加して残留 γ 量を変えた試料も作製し、合計 4 種類の試料の転動疲労寿命を評価すると Fig. 1 の結果となり、残留 γ が多いほど転動疲労寿命が長いことを確認している¹⁾。

2.3 組織解析

応力繰り返しに伴う表面の硬さと残留 γ 量の変化をビッカース硬さ測定と X 線回折で確認した結果、 3.7×10^6 回までに加工誘起マルテンサイト変態に起因すると考えられる硬さの上昇と残留 γ の減少がおよそ完了していたため、この時点（転動疲労後と表記）の組織について走査電子顕微鏡を用いた電子線後方散乱回折 (SEM-EBSD) により調査し、転動疲労前の組織と比較した。SEM-EBSD は、転がり接触による直交せん断応力が最大になる深さ (0.24 mm 深さ) の転がり接触面と平行な断面を、EBSD データ収集システム (TSL 製 OIM) により、加速電圧 15 kV、作動距離 15 mm、ステップサイズ 40 nm または 10 nm の条件で測定した。また、転動疲労後の組織についてさらに詳細に解析するため、透過型電子顕微鏡を用いたナノビームプリセッション電子回折法による組織解析 (ACOM-TEM) も実施した。本手法は数 nm に絞った電子プローブを薄膜試料に照射した際の電子回折図形から結晶情報を得るために、SEM-EBSD よりも空間分解能が 1 衍程度高いことが特徴である。解析に使用する薄膜試料は、SEM-EBSD 測定に使用する面と同じ断面から電解研磨と Ar イオンミリングによって作製した。測定は ASTAR (NanoMEGAS 製) を用い、加速電圧 200 kV、プリセッション角 0.5°、ステップサイズ 2 nm の条件で行った。

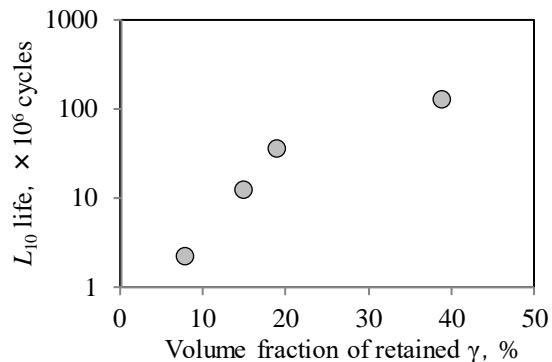


Fig. 1 Relationship between volume fraction of retained austenite and L_{10} life.

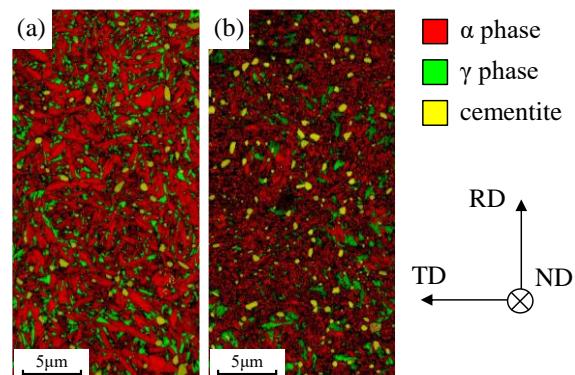


Fig. 2 Phase maps obtained using SEM-EBSD. Number of cycles were (a) 0 (before test) and (b) 3.7×10^6 (after test)²⁾.

3. 実験結果

3.1 転がり接触に伴う組織全体の変化 (SEM-EBSD)

測定範囲 $16\text{ }\mu\text{m} \times 32\text{ }\mu\text{m}$, ステップサイズ 40 nm で測定した phase マップを Fig.2²⁾に示す。試料の転がり方向を RD, 転がり面横断方向を TD, 転がり面法線方向を ND として表記している。Fig.2(a)より、転動疲労前は焼戻しマルテンサイト (α 相), 残留 γ (γ 相), セメントサイトが確認できる。2.3 節で述べたように、転動疲労後は残留 γ が減少し、硬さが上昇しているが、組織が微細であるため Fig.2(b)に示す転動疲労後の結果からは詳細な組織変化を確認できず、加工誘起マルテンサイトの特徴を捉えることができていない。

3.2 転がり接触に伴う焼戻しマルテンサイトと残留 γ の変化 (SEM-EBSD)

転がり接触中に加工誘起変態によって生成するマルテンサイトの形態はこれまで明らかにされていない。そのため、非常に微細な形で存在しており、3.1 節の測定では EBSD パターンが得られなかつた可能性が考えられる。そこで、微細な加工誘起マルテンサイトを捉えることを目的に、任意の残留 γ 粒に着目してステップサイズ 10 nm で測定した。まず、転動疲労前の組織の phase マップを Fig.3(a)²⁾に示す。焼戻しマルテンサイトと残留 γ は、いずれも μm オーダーのサイズであることが確認できる。次に、転動疲労後の組織の phase マップを Fig.3(b)²⁾に示す。焼戻しマルテンサイトは、転動疲労前と比較してサブミクロン程度まで微細化していることがわかる。これは、過去に TEM などを用いて観察された結果と同様であり、転がり接触に伴う塑性ひずみの導入によって転位セルが形成され、微細粒が生成したと考えられる。一方、残留 γ は焼戻しマルテンサイトで確認されたような微細化は生じておらず、 μm オーダーのサイズを維持していることがわかる。残留 γ の粒の内部に着目すると、周囲の微細化した焼戻しマルテンサイトとは明らかに形態が異なる、微小な α 相が点在している様子が見て取れる。これらは転動疲労前には存在していなかったことから、転がり接触中の応力によって残留 γ から生成した加工誘起マルテンサイトであると判断できる。

3.3 転がり接触に伴う残留 γ の変化 (ACOM-TEM)

転動疲労後の組織において、任意の残留 γ 粒に着目して ACOM-TEM 解析を行った結果を Fig.4²⁾に示す。Fig.4(a)の明視野像において、周囲の組織より凹凸が小さい平坦な組織が確認され、Fig.4(b)の phase マップより、この平坦な組織が残留 γ を主とした粒であることがわかる。さらに、残留 γ の粒内には微細な α 相 (3.2 節で述べた加工誘起マルテンサイトに対応) が多数存在していることが確認できる。この加工誘起マルテンサイトのサイズを定量的に評価することは困難であるものの、5 ピクセル以下のサイズのものも存在し、最も小さいものは数 nm 程度であると考えられる。以上のように、SEM-EBSD では明瞭に捉えることはできなかつたものの、ACOM-TEM を活用することで極めて微細な加工誘起マルテンサイトが高密度で分散していることを明らかにした。

4. 考察

転がり接触中に生成する加工誘起マルテンサイトは主として残留 γ の粒内で発生することを確認した。これは、加工誘起マルテンサイト変態のメカニズムに関する先行研究³⁾を参考にすると、残留 γ が塑性変形することで生じる粒内の不均一変形領域を核として加工誘起マルテンサイトが生成しているためであると考えられる。すなわち、残留 γ が塑性変形するような比較的大きな負荷で軸受が使用される場合に、微細な加工誘起マルテンサイトが高密度で生成することで、転動疲労寿命の向上をもたらすといえる。

5. まとめ

従来から知られていた現象である残留 γ による転動疲労寿命の向上について、詳細な組織解析を実施してメカニズムを考察した。残留 γ は転がり接触によって微細な加工誘起マルテンサイトに変態し、高密度で組織中に分散することによって組織を強化し、転動疲労寿命を向上させている可能性があると結論付けた。

文献

- 1) 金谷康平・三上 剛・潮田浩作：鉄と鋼, 105, (2019) 550.
- 2) 金谷康平・諸永 拓・原 徹・潮田浩作：鉄と鋼, 106, (2020) 953.
- 3) G. B. Olson and M. Cohen: J. Less-Common. Met., 28, (1972) 107.

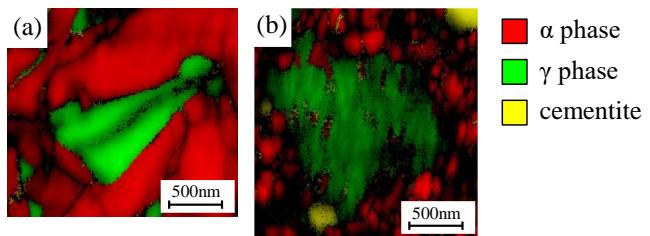


Fig. 3 Phase maps centered on retained austenite obtained using SEM-EBSD. Number of cycles were (a) 0 (before test) and (b) 3.7×10^6 (after test)²⁾.

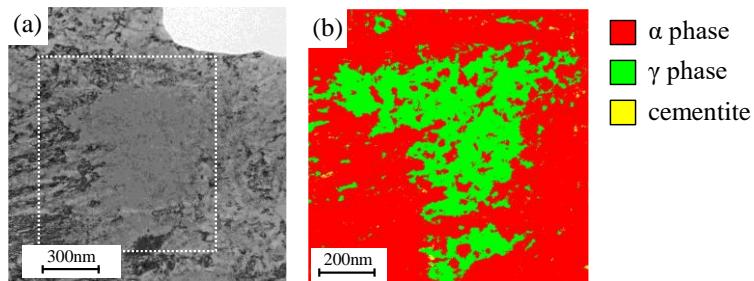


Fig. 4 ACOM-TEM analyses of retained austenite after test (3.7×10^6 cycles). (a) TEM bright field image and (b) phase map measured in the white dotted line area²⁾.