

繰り返し高周波焼入れ処理した炭素鋼の油潤滑環境下における摩擦摩耗特性

Friction and wear properties under oil lubrication in carbon steel processed by
repeated induction heating and quenching

豊橋技科大（学）*宮田 航英

豊橋技科大（非）足立 望

豊橋技科大（正）戸高 義一

ネツレン（非）鈴木 拓哉

ネツレン（非）塚原 真宏

ネツレン（非）井戸原 修

Koie Miyata *, Nozomu Adachi *, Yoshikazu Todaka *, Takuya Suzuki **, Masahiro Tsukahara **, Osamu Idohara **

* Toyohashi University of Technology, ** Neturen Co., Ltd.

1. 緒言

著者らは、強ひずみ加工により組織を微細化（転位や結晶粒界などの格子欠陥を高密度に導入）し高周波焼入れ（IHQ: Induction Heating and Quenching）を行なった炭素鋼において、油潤滑環境下で表面に均一な潤滑膜（Fe-O-P系化合物）を形成し、トラクション係数（摩擦係数 μ ）が低下することを明らかにした[1]。これは、高密度格子欠陥の導入に伴って鋼材表面と潤滑油分子の相互作用が向上した結果、鋼材表面に対する潤滑油分子の吸着が促進したことによる起因する[2]。しかし、強ひずみ加工による高密度格子欠陥の導入は一般に容易ではない。そこで著者らは、炭素鋼に対して IHQ を繰り返すことで旧オーステナイト (γ) 粒組織、マルテンサイト (α') 組織の微細化を試み、高密度な格子欠陥の導入に成功した[3]。IHQ を 1 回のみ、または繰り返し行なった試料を作製し、それぞれ粗粒材、細粒材と称する。Figure 1 に、旧 γ 粒界を現出するためにピクリン酸腐食した粗粒材と細粒材の SEM 像を示す。細粒材は、粗粒材と比較して旧 γ 粒が微細化していることが分かる。Figure 2 に、粗粒材と細粒材の油潤滑環境下におけるトラクション試験の結果を示す[3]。両試料とも開始 10min 程度まで μ が同様に低下したが、それ以降は μ の低下する割合が異なることが分かる。最終的に粗粒材が約 0.09 の μ を示したのに対し、粗粒材と比較して高密度に格子欠陥を導入した細粒材は約 0.08 の μ を示し、低 μ 化した。

本研究の目的は、細粒材における低 μ 化の要因として組織微細化による潤滑膜形成の促進が考えられることから、摺動面に形成した潤滑膜を調査することである。

2. 実験方法

供試材として、一般的に IHQ に用いられる S55C 炭素鋼を使用した。IHQ を 1 回のみ、または 4 回繰り返し行なった粗粒材および細粒材を作製し、2 種類の試料を作製した。旧 γ 粒径は面積計量法により算出した。表層の硬さはビッカース硬さ試験により測定した。転位密度は 350°C で焼戻しした試料を MWH/WA 法により測定した。C を過飽和に固溶した α' は正方晶 (bcc) であり、この bcc- α' が残ったまま X 線回折により転位密度を測定すると回折ピークが分離して、正確に転位密度を評価できない[4]。そこで C を拡散させ bcc- α' から bcc- α' に変化し、かつ転位の回復を起こさない温度として 350°C で焼戻しを行なった。摩擦摩耗特性の評価は、リング・オン・リング型トラクション試験機により行った。試験には、前述の熱処理を施した S55C 炭素鋼製の小リングと、浸炭焼入れした表層硬さ HV 7.5GPa の SCM420 鋼製の大リングを使用した。トラクション試験の条件は、すべり率: -40%，荷重: 300N、回転速度: 1500rpm、試験時間: 60min とした。潤滑油には添加剤に P と Ca を多く含有する NISSAN マチックフルード D を使用し、油温: 80°C とした。試験後の摺動面に対して、レーザー顕微鏡および SEM/EDX による観察・分析を行なった。

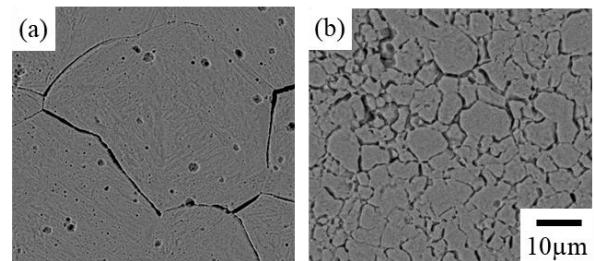


Fig. 1 SEM images of carbon steel. (a) coarse grain and (b) fine grain samples.

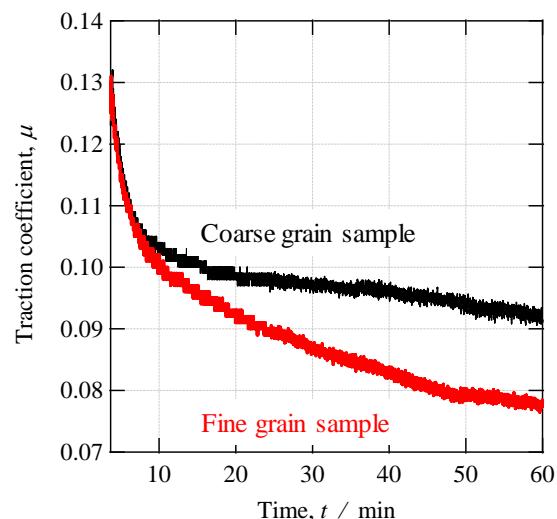


Fig. 2 Changes of the traction coefficient under oil lubrication in coarse and fine grain samples [3].

Table 1 Prior γ grain size, Vickers hardness and dislocation density of samples.

	Prior γ grain size [μm]	Vickers hardness [GPa]	dislocation density [m^{-2}]
Coarse grain sample	41	7.7	4.8×10^{15}
Fine grain sample	2.6	7.7	4.8×10^{15}

3. 実験結果及び考察

Tabel 1に旧 γ 粒径、ビッカース硬さおよび転位密度を示す。粗粒材と細粒材で硬さと転位密度の差が無いことから、粗粒材と細粒材の硬さと転位密度の差が摩擦摩耗特性に与える影響は小さいと考えられる。

トラクション試験後の粗粒材と細粒材において、レーザー顕微鏡による摺動面の観察結果から、両試料の摩耗形態に差は見られず、摩耗の程度が低いことが分かった。一方、Fig.3 に示すように、細粒材の未摺動面と摺動面の SEM BSE 像より、摺動面では、母相と考えられる薄灰色の Fe と異なる、濃灰色の領域が広く見られる。これは、粗粒材に対しても同様であった。BSE 像では、コントラストは原子番号に依存するため、軽い元素ほど暗く、重い元素ほど明るく観察される。すなわち、摺動面の濃灰色の領域では、トラクション試験中に Fe と潤滑油中の軽元素が反応し、化合物が形成したことが示唆された。しかし、粗粒材と細粒材で摺動面の濃灰色の領域の広さと均一性は異なった。粗粒材の摺動面では濃灰色の領域が少なく、不均一に分布しているのに対して、細粒材の摺動面では濃灰色の領域が広く、均一に分布していた。SEM/EDX による面分析の結果より、細粒材は粗粒材と比較して O 濃度の高い領域が広いことが分かった。Figure 4 に示すように、細粒材の SEM BSE 像である Fig.3 の未摺動面と摺動面の各領域に対して点分析を行なった。未摺動面における薄灰色の領域を緑色の点で示す。摺動面における薄灰色の領域および濃灰色の領域を、それぞれ青色と赤色の点で示す。摺動面の濃灰色の領域では、未摺動面と摺動面の薄灰色の領域と比較して、O と P が高く検出された。しかし、粗粒材においては、濃灰色の領域で O は高く検出されたが、P は検出されなかった。このことから、細粒材は、広く均一な Fe-O-P 系化合物の潤滑膜を形成し、母相が保護されることで低 μ 化したと考えられる。

4. 結言

格子欠陥密度の高い細粒材では、鋼材表面と潤滑油分子の相互作用が向上し、Fe-O-P 系化合物の潤滑膜を形成して低 μ 化したと考えられる。格子欠陥密度が異なることで形成する潤滑膜の種類、形態が異なり、それらの違いが摩擦摩耗特性に影響を与えることが分かった。

参考文献

- [1] 岡田・大林・戸高・足立・光原: 鉄と鋼, 106 (2020), 194.
- [2] 戸高・足立: 表面技術, 71 (2020), 756.
- [3] 宮田・戸高・足立・高橋・手島・鈴木・塚原・井戸原: 材料とプロセス, 35 (2022), PS-61.
- [4] 岩村・塚原・井戸原・三阪・高木: 鉄と鋼, 107 (2021), 853.

謝辞

本研究は、日本学術振興会 科学研究費補助金 基盤研究(A)22H00261, 基盤研究(B)15H04155, 科学技術振興機構 産学共創基礎基盤研究プログラム「ヘテロ構造制御」 JPMJSK1511 の支援を受けて行なわれたものであり、ここに深甚なる謝意を表します。転位密度測定を実施するにあたり、ご協力いただきました株式会社リガク 根津暁充氏に厚く御礼申し上げます。

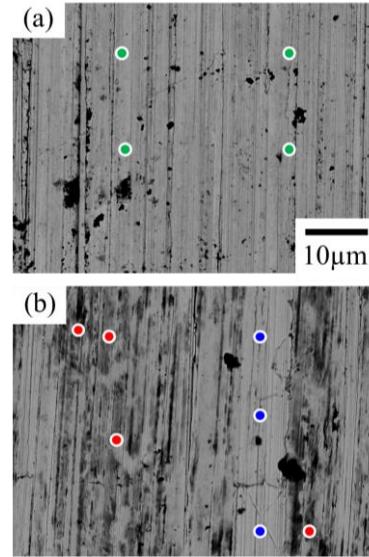


Fig. 3 SEM BSE images of fine grain sample.
(a) non-wear track and (b) wear track.

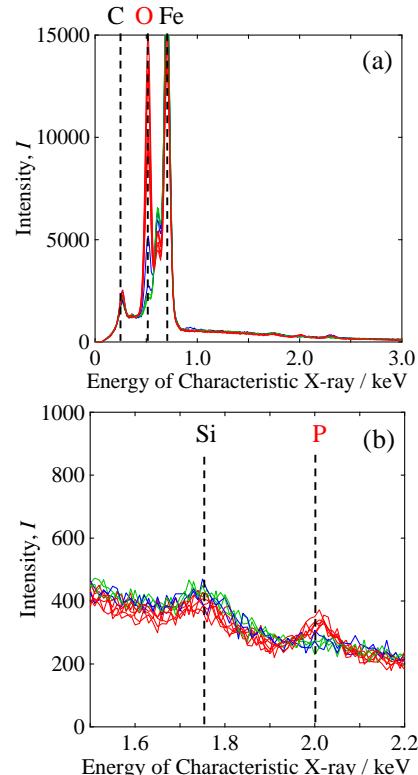


Fig. 4 SEM/EDX point analysis of fine grain sample.
(a) wide range and (b) range of 1.6 to 2.2keV.