

技術資料



Technical Data

低粘度油環境における浸炭浸窒鋼のピッチング寿命 およびき裂進展挙動

玉井智也^{*1}, 村田憲治^{*2}, 大橋亮介^{*1}, 山崎歩見^{*1}

Pitting Life and Crack Propagation Behavior of Carbonitrided Steel with Low Viscosity Fluid

Tomoya TAMAI, Kenji MURATA, Ryosuke OHASHI and Ayumi YAMAZAKI

Synopsis

In recent years, the viscosity of transmission fluid for automobiles has been lowered to improve fuel efficiency. However, lowering the viscosity of the transmission fluid increases the friction coefficient and the temperature of the gear surface, which may reduce the pitting life. Previous studies have reported that improving the softening resistance of gears is an effective way to suppress pitting fracture. Therefore, the carbonitriding process is considered effective in improving the pitting life because the process enhances the softening resistance of steel. However, the pitting life and failure process of carbonitrided steel have not been investigated in detail.

In this study, the pitting life and failure process of carbonitrided steel were investigated by roller pitting tests with low viscosity fluid. As a result, it was revealed that the pitting life of the carbonitrided steel was longer than that of the carburized steel. It was considered that the crack propagation on carbonitrided steel during the roller pitting test was suppressed because the hardness near the contact surface was maintained at a high level.

1. 緒 言

自動車の低燃費化に向けた取り組みのひとつに、トランスミッション用油剤の低粘度化による攪拌抵抗の低減がある¹⁾。一方、歯車表面の油膜は油剤の低粘度化に伴って薄膜化し、境界潤滑状態に近づくため、摩擦係数増大による歯面温度の上昇や歯面疲労強度の低下が懸念される²⁾。また、近年進んでいる電動化も歯面潤滑状態の悪化を促進する要因となる。電動車用モーターはエンジン対比で高回転となるため、歯車における発熱量が大きくなると想定される。したがって、歯面疲労強度向上は今後一層重要となると考えられる。

歯面における主要な疲労損傷形態にはピッチングがある。ピッチングの抑制には、摺動時の発熱による軟化を抑制するため、歯車用鋼材の焼戻し軟化抵抗を向上させることが有効とされている^{3), 4)}。高軟化抵抗鋼を用いることで、低粘度油潤滑においてもピッチング寿命が向上することが報告されている⁵⁾。

焼戻し軟化抵抗を向上させる手法としては、鋼種成分の調整の他に、表面硬化熱処理の活用がある。浸炭浸窒処理においては、鋼材に導入された窒素が焼戻し中に鉄窒化物や合金元素のクラスターとして析出するため、高温での軟化を抑制可能である^{6), 7)}。さらに、浸炭浸窒処理用に鋼種成分を調整した開発鋼との組み合わせによって、汎用鋼

2025年 10月 16日 受付

* 1 大同特殊鋼(株)技術開発研究所 (Corporate Research & Development Center, Daido Steel Co., Ltd.)

* 2 大同特殊鋼(株)技術開発研究所, 工博 (Dr. Eng., Corporate Research & Development Center, Daido Steel Co., Ltd.)

のガス浸炭処理品対比で高い曲げ疲労強度が得られることが報告されており⁸⁾、高強度歯車用鋼として需要が期待されている。しかしながら、低粘度油潤滑下で浸炭浸窒材のピッチング寿命評価を行った事例はない。

以上から、本研究では低粘度油潤滑下で浸炭浸窒材のローラーピッチング試験（以下、RP試験）を行い、ピッチング寿命および損傷過程を調査することで、ピッチング損傷に対する浸炭浸窒処理の有効性について明らかにした。

2. 実験方法

2. 1 供試材

本研究で用いた鋼材の成分を Table 1 に示す。浸炭浸窒処理用の開発鋼⁸⁾（以下、開発鋼）は主要添加元素である Si, Mn, Crなどを調整することで、粗大な窒化物の生成抑制と焼入れ性を両立している。また、比較用の汎用鋼には JIS-SCM420（以下、SCM420）を用いた。

これらの鋼材を 150 kg の真空誘導炉で溶製後、熱間鍛造により $\phi 34$ の棒鋼に鍛伸し、920 °C で焼鈍処理を施した。開発鋼については試験片粗加工として $\phi 26.1$ mm \times 130 mm に機械加工したのち、930 °C でのガス浸炭浸窒処理、油焼入れ、焼戻し（160 °C, 7.2 ks）を施した。SCM420 については、 $\phi 26.3$ mm \times 130 mm としたのち、930 °C でのガス浸炭処理および開発鋼同様の油焼入れ、焼戻しを施した。焼戻し後、それぞれの試験片の試験部（転走面）を研磨することにより、 $\phi 26.0$ mm、粗さ $Ra=0.15$ μ m 程度の RP 試験片（試験ローラー）を作製した。Table 2 に試験片品質を示す。浸炭浸窒および浸炭条件の調整により、表層硬さと有効硬化層深さが同等の試験片が得られた。また、ピッチング寿命との相関があるとされる 300 °C 焼戻し硬さ^{3), 4)}については開発鋼-浸炭浸窒材の方が高位であった。

Table 1. Chemical composition (mass%).

Material	C	Si	Mn	Cr	Mo	Fe
Developed steel	0.20	0.05	1.49	0.60	0.14	Bal.
JIS-SCM420	0.20	0.20	0.72	0.99	0.15	Bal.

Table 2. Properties of RP specimens.

	Developed steel -carbonitriding	JIS-SCM420 -carburizing
Surface roughness Ra [μ m]	0.156	0.130
C content at 0.05 mm [mass%]	0.57	0.64
N content at 0.05 mm [mass%]	0.36	-
Hardness at 0.05 mm [HV]	707	704
Microstructure	Martensite (+retained γ)	Martensite (+retained γ)
Retained γ volume at surface [%]	28.9	16.1
Effective case depth [mm]	1.33	1.40
Hardness at 0.05 mm after tempering at 300 °C [HV]	649	598

2. 2 試験方法

ピッチング寿命および損傷過程の評価には、(株)ニッコークリエイト製の RP 試験機（RPT-201 型）を用いた。RP 試験は Fig. 1 に示すように、試験ローラーと負荷ローラー（相手材）を一定面圧で接触させつつ異なる周速度で回転させることで、試験ローラーにピッチングを生じさせる試験である。Table 3 に試験条件を示す。寿命評価試験として、面圧 3.0 GPa、すべり速度 -1.22 m/s、各鋼種 N=3 の試験を実施した。潤滑には Table 4 に示す特性を持つ低粘度のオートマチックトランスミッション用フルードを用い、油温は 90 °C とした。ピッチング寿命は振動検出により試験機が停止した繰り返し数とし、最大 10^7 回で打ち切りとした。さらに、損傷過程調査として、繰り返し数を 10^4 , 10^5 , 10^6 回、各条件 N=1 の途中止め試験を実施した。途中止め試験のその他条件は寿命評価試験と同一とした。

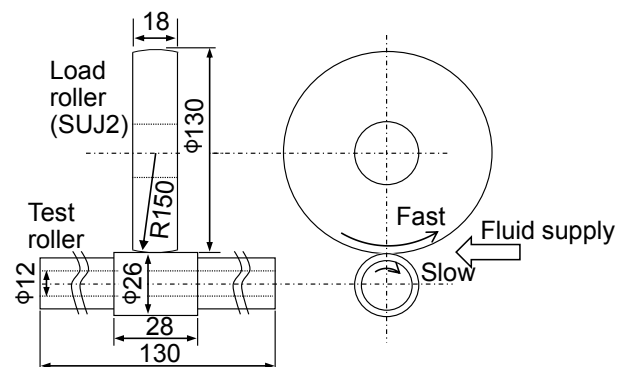


Fig. 1. Schematic diagram of RP testing.

Table 3. Conditions of RP testing.

		Test conditions
Test roller (Specimen)		φ 26
Load roller (SUJ2 : 61±1 HRC)		φ 130 (R150)
Test roller	Rev. [rpm]	1500
	Slip ratio [%]	-60
	Slip speed [m/s]	-1.22
Maximum Hertzian pressure [GPa]		3.0
Fluid temp. [°C]		90 (Flow rate: 2 L/min)

Table 4. Properties of fluid used in the testing.

		Low viscosity fluid
Kinematic viscosity	at 100 °C [mm ² /s]	4.2
	at 40 °C [mm ² /s]	18.3
Viscosity index		133

寿命試験後の試験ローラーに対して転走部表面および断面のミクロ観察を光学顕微鏡および走査型電子顕微鏡（SEM）を用いて実施し、損傷形態を調査した。途中止め試験後の試験ローラーに対しては、上記に加えてSEM観察によるき裂測定を実施した。転走面表面からランダムに5視野を観察し（合計面積 1.41 mm²）、視野内のすべてのき裂から、き裂密度および平均き裂幅を算出した。また、転走面断面からき裂のある個所を10視野以上観察し、最大き裂深さを算出した。

3. 結果および考察

3. 1 ピッチング寿命評価試験結果

Fig. 2に開発鋼 - 浸炭浸窒材およびSCM420 - 浸炭材のピッチング寿命を示す。開発鋼 - 浸炭浸窒材のピッチング寿命はSCM420 - 浸炭材対比で長寿命であった。また、Fig. 3に転走面の外観写真およびSEM観察結果（二次電子像）の代表を示す。開発鋼 - 浸炭浸窒材、SCM420 - 浸炭材ともに、転走面には典型的なピッチング損傷とされる矢じり型の剥離がみられた。Fig. 4は転走面断面のSEM観察結果（二次電子像）である。開発鋼 - 浸炭浸窒材、SCM420 - 浸炭材ともに表層にき裂がみられた。さらに、SCM420 - 浸炭材においてはマイクロピッチングやき裂の結合が確認された。Fig. 5には転走面断面のSEM-EBSD観察結果（IPF map）を示す。開発鋼 - 浸炭浸窒材、SCM420 - 浸炭材ともに表層

付近において組織の微細化がみられた。これは grain subdivision⁹⁾に相当すると考えられ、転走によって表層に大きな塑性加工が生じ、結晶粒が分断されたことが推測される。また、開発鋼 - 浸炭浸窒材はSCM420 - 浸炭材対比で微細組織領域が表層付近に留まっていた。これは、開発鋼 - 浸炭浸窒材はSCM420 - 浸炭材対比で焼戻し軟化抵抗が大きく、転走時の発熱による軟化が抑制されたためであると推定される。鋼材の硬さが維持されれば、表面から離れた領域において塑性変形は生じにくいと考えられる。

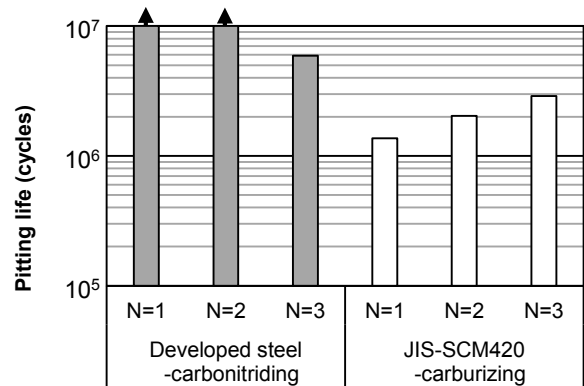


Fig. 2. Pitting life of RP specimens.

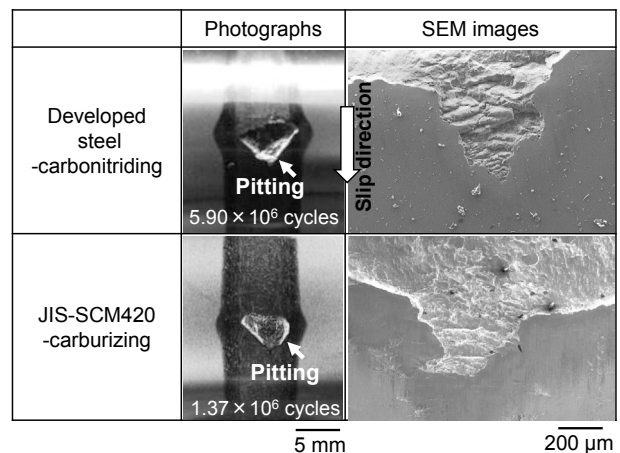


Fig. 3. Appearance of pitting fractures on RP specimens.

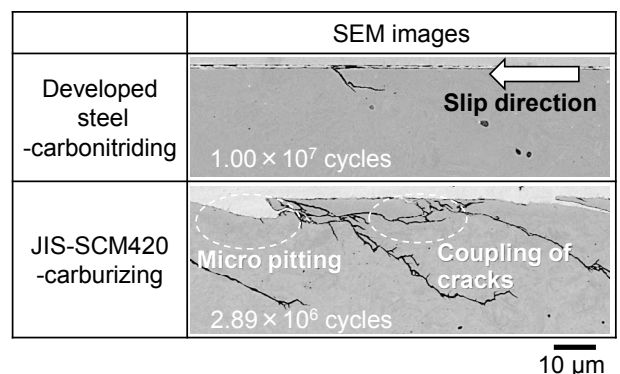


Fig. 4. SEM images at the cross section of RP specimens.

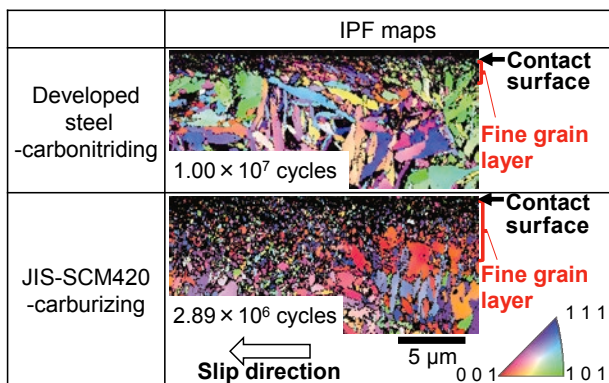


Fig. 5. IPF maps at the cross section of RP specimens.

3. 2 途中止め試験結果

Fig. 6 に各繰返し数で途中止め試験を行った後の転走面 SEM 観察結果（二次電子像）を示す。SCM420 - 浸炭材，開発鋼 - 浸炭浸窒材ともに，10⁴ 回時点でき裂が発生していた。SCM420 - 浸炭材は開発鋼 - 浸炭浸窒材対比でき裂幅が大きく，10⁶ 回時点で部分的なき裂の結合およびマイクロピッチングがみられた。

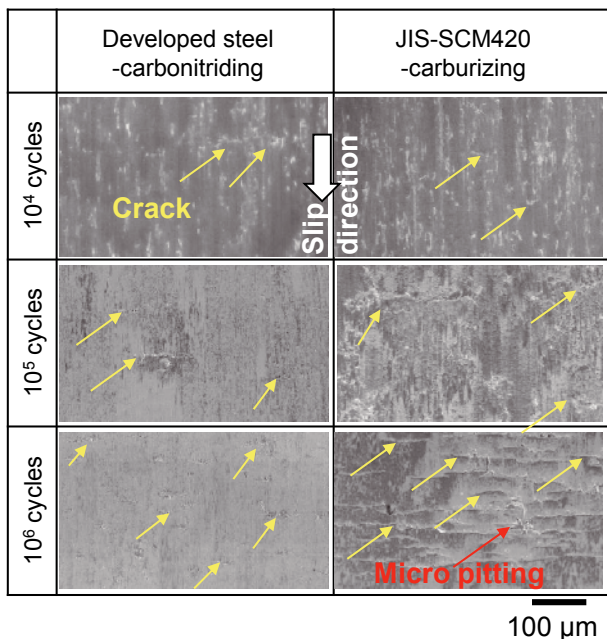
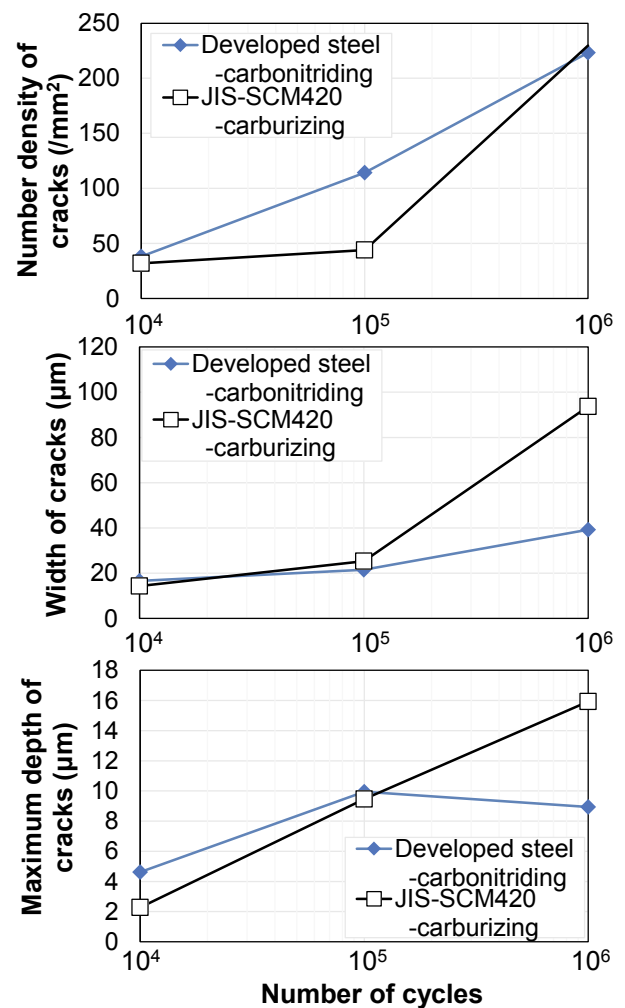
Fig. 6. Appearance of rolling surface of RP specimens after 10⁴ ~10⁶ cycles.

Fig. 7 には各繰返し数におけるき裂の測定結果を示す。開発鋼 - 浸炭浸窒材と SCM420 - 浸炭材において，繰返し数増加に伴うき裂密度の変化に大きな差異はみられなかった。き裂幅および最大き裂深さについては，SCM420 - 浸炭材において 10⁵ 回以降に大きな増加がみられた一方，開発鋼 - 浸炭浸窒材においては増加が比較

的軽微であった。

Fig. 8 に各繰返し数における転走面の断面組織（IPF map）を示す。開発鋼 - 浸炭浸窒材，SCM420 - 浸炭材ともに，10⁴ 回時点から表層付近の組織微細化がみられた。繰返し数の増加に伴い，微細組織領域は内部に広がっていったが，開発鋼 - 浸炭浸窒材は SCM420 - 浸炭材対比で微細組織領域が表層付近に留まっていた。

Fig. 7. Number density, width, and maximum depth of cracks after 10⁴ ~10⁶ cycles.

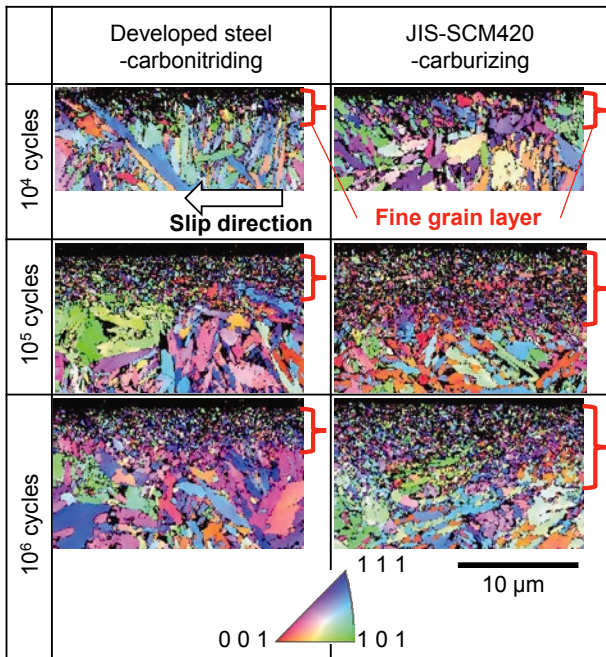


Fig. 8. IPF maps at the cross section of RP specimens after 10⁴ ~10⁶ cycles.

3. 3 ピッチング損傷の素過程

開発鋼 - 浸炭浸窒材のピッチング寿命が SCM420 - 浸炭材対比で向上した要因について、途中止め試験の結果から考察する。Fig. 7 より、開発鋼 - 浸炭浸窒材は SCM420 - 浸炭材対比でき裂密度、すなわち、き裂の発生量の差異がなかった一方、き裂の進展（き裂の幅および深さの成長）が抑制されていた。これが開発鋼 - 浸炭浸窒化材におけるピッチング寿命向上の要因であると推定される。

以上をまとめた RP 試験中のき裂の発生・進展挙動の模式図を Fig. 9 に示す。開発鋼 - 浸炭浸窒材、SCM420 - 浸炭材ともに、 $\sim 10^4$ 回において転走面表層に亀裂が発生する。SCM420 - 浸炭材では、 $\sim 10^6$ 回において、き裂幅、深さ増大によりき裂同士の間結合や微小な剥離が生じ、さらなる繰り返し数の増加に伴いき裂の進展、剥離が繰り返され、ピッチング破壊に至る。一方で、開発鋼 - 浸炭浸窒材においてはき裂の進展が抑制されることから、上記の剥離が生じにくく、ピッチング寿命が向上する。

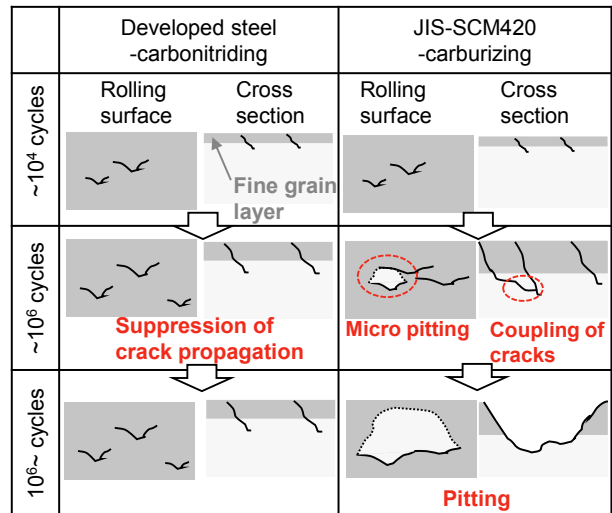


Fig. 9. Schematic illustration of pitting failure in RP testing.

3. 4 き裂進展の抑制原因

次に、開発鋼 - 浸炭浸窒材においてき裂進展が抑制された原因について考察する。

まず、疲労き裂の進展には残留 γ や圧縮残留応力が影響することが知られている^{2), 10), 11), 12)}。これを検証するため、途中止め試験前後における転走面の残留 γ 、残留応力を X 線回折法によって測定した。残留応力の測定は JIS-B2711 に規定される X 線残留応力測定法に準拠して実施した。測定条件は、特性 X 線を CrK α 線、測定方向を試験片の回転方向と同方向とした。残留 γ 、残留応力の測定結果を Fig. 10、Fig. 11 にそれぞれ示す。試験前の残留 γ 量は開発鋼 - 浸炭浸窒材の方が SCM420 - 浸炭材対比で多い。一方、繰り返し数の増加に伴い差異は小さくなっていき、開発鋼 - 浸炭浸窒材においてき裂の停留がみられた 10⁶ 回時点ではほぼ同等であった。残留応力については、開発鋼 - 浸炭浸窒材、SCM420 - 浸炭材共に 10⁴ 回時点で圧縮残留応力が解放されており、鋼種間で大きな差異は見られなかった。以上より、本試験においては、残留 γ および残留応力はき裂進展挙動の鋼種間差異に対する要因ではなかったことが推察される。

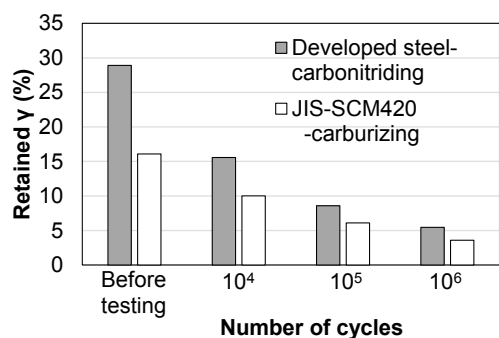


Fig. 10. Retained γ at the surface of RP specimens.

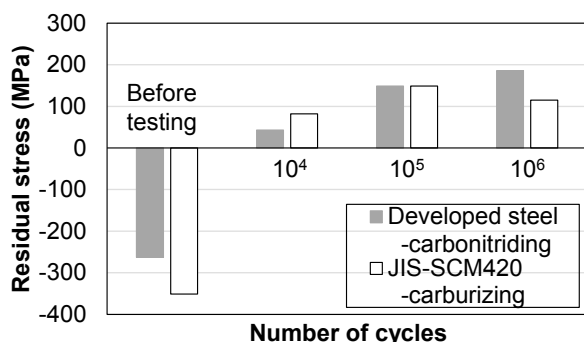
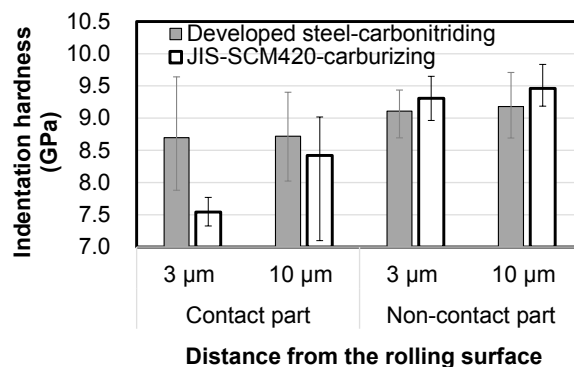


Fig. 11. Residual stress at the surface of RP specimens.

また、転走によるき裂は微細組織領域の拡大に伴い進展するという報告がある⁹⁾。一方で本試験では、Fig. 7 および Fig. 8 に示した通り、き裂深さと微細組織領域は必ずしも一致していない。例えば、10⁶ 回時点では、最大き裂深さ (8 μm 程度) > 微細組織領域の深さ (3 μm 程度) である。その他の影響因子について、村上らは、材料の硬さが大きいほどき裂進展に必要な応力は増大することを報告している¹³⁾。検証のため、10⁶ 回で途中止めをした試験片の転走部断面に対し、ナノインデンテーション硬さを測定した。測定結果を Fig. 12 に示す。両鋼種に共通して、接触部分のナノインデンテーション硬さは非接触部分対比で低位傾向である。一方、接触部表面から 3 μm 位置におけるナノインデンテーション硬さは、開発鋼 - 浸炭浸窒材の方が SCM420 - 浸炭材対比で大きい。ここから、開発鋼 - 浸炭浸窒材と SCM420 - 浸炭材のき裂進展挙動の差異には、表層極近傍における硬さの差異が影響していたことが推定される。ただし Fig. 7 に示した通り、10⁶ 回時点での最大き裂深さは両鋼種ともに 3 μm を超えている。10 μm 位置でのナノインデンテーション硬さは鋼種間の差異が小さく、この点に関しては今後の検討課題である。推定とし

て、開発鋼 - 浸炭浸窒材は表層極近傍硬さが大きいので、き裂幅の増大が抑制され、き裂の結合が生じにくくなることが考えられる。

表層極近傍における硬さについて開発鋼 - 浸炭浸窒材が SCM420 - 浸炭材対比で優位であった要因としては、摺動発熱に伴う鉄窒化物析出により、軟化が抑制されたことが推定される。

Fig. 12. Indentation hardness near the surface of RP specimens after 10⁶ cycles.

4. 結 言

RP 試験を行い、低粘度油潤滑下における開発鋼 - 浸炭浸窒材および SCM420 - 浸炭材のピッチング寿命、損傷過程を調査した。以下にその結果を示す。

1. 低粘度油潤滑下における開発鋼 - 浸炭浸窒材のピッチング寿命は SCM420 - 浸炭材対比で長寿命であった。
2. 開発鋼 - 浸炭浸窒材における長寿命化の要因は 10⁵ 回以降のき裂の停留にあると推定される。
3. 開発鋼 - 浸炭浸窒材においてき裂が停留した要因は、試験中に表層付近の硬さが高いまま維持されたことであると推定される。

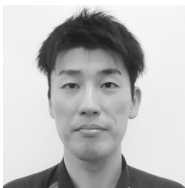
謝辞

本研究にあたり、潤滑油のご提供をはじめ様々なご協力をいただいた本田晃之氏 (アフトンケミカル・ジャパン(株))、光井秀明氏に感謝いたします。

(文 献)

- 1) 村上靖宏, 光井秀明, C. Cleveland, 田中優樹, 樋口成起, 井上圭介: 自動車技術会 秋季学術講演会 学術講演予稿集, (2020), 20206119.
- 2) 鈴木智博, 小川一義, 堀田昇次: 豊田中央研究所 R&Dレビュー, **34**(1999), 25.
- 3) 羽生田智紀, 中村貞行: 電気製鋼, **71**(2000), 59.
- 4) 渡辺陽一, 成田直樹, 村上陽一: 日産技報, **50**(2002), 68.
- 5) 樋口成起, 田中優樹, 井上圭介, 光井秀明, 村上靖宏: 電気製鋼, **91**(2020), 38.
- 6) 林幸宏, 辻井健太, 山崎歩見, 田中優樹, 佐藤充孝, 宮本吾郎, 古原忠: 日本鉄鋼協会講演大会概要集 材料とプロセス, **182**(2021), 470.
- 7) S. W. Young, M. Sato, K. Yamamitsu, Y. Shimada, Y. Zhang, G. Miyamoto, T. Furuhashi : Acta Materialia, **206**(2021), 116612.
- 8) 大同特殊鋼(株): 電気製鋼, **95**(2025), 61.
- 9) 橋本和弥, 洲上太一, 鎌恵介, 梅澤修: 鉄と鋼, **108**(2022), 76.
- 10) 石倉亮平, 井上圭介, 小林祐次, 辻俊哉: 電気製鋼, **81**(2010), 99.
- 11) 山口浩平, 石倉亮平, 松村康志: 電気製鋼, **84**(2013), 5.
- 12) 矢島悦次郎, 宮崎亨, 杉山敏彦, 寺島博夫: 日本金属学会誌, **36**(1972), 711.
- 13) 村上敬宜, 藤正浩: 材料, **35**(1986), 911.

本資料は、一般社団法人日本鉄鋼協会 第 184 回秋季講演大会で講演された「低粘度油を用いた浸炭窒化鋼の転動疲労寿命」に加筆修正したものである。



玉井智也



村田憲治



大橋亮介



山崎歩見