

## 歯車鋼の耐疲労摩耗特性に及ぼす熱処理の影響

## Effects of Heat Treatments on Fatigue Wear Resistance of Gear Steel

東理大・工（学）\*門前 颯人 東理大・工（学）吉岡 海人 東理大・院（学）大橋 遼太郎

東理大・院（正）國井 卓人 東理大（正）佐藤 魁星 東理大（正）佐々木 信也

Hayato Monzen\*, Kaito Yoshioka\*, Ryotaro Ohashi\*\*, Takuto Kunii\*\*, Kaisei Sato\*, Shinya Sasaki\*

\*Tokyo University of Science, \*\* Tokyo University of Science Graduate School

## 1. 緒言

脱炭素社会の実現のため、電気自動車（EV）の普及が推進されている。電気自動車の普及には、エネルギー効率の向上が不可欠であり、E-Axle と呼ばれるパワーユニットの小型化が進められている。E-Axle の小型化においては、出力の維持が重要なことから、モータの高回転化が進められている。しかしながら、減速機においては、高回転化に伴って歯車の歯面同士の接触回数が増加し、疲労損傷が生じやすくなることが問題となる。特に、歯面におけるピッチングの発生は振動や騒音に加え、機械の動作不良の直接的な要因となるため、その抑制が求められている。

材料の性質を変化させ、耐疲労摩耗特性を向上させる熱処理は、機械部品に広く用いられている。特に、浸炭焼入れ処理は、歯車表面の熱処理の主流となっている。しかし、この熱処理は処理後の変形量が大きく、仕上げに切削や研削を必要とすることから、処理後の変形量が小さいガス軟室化処理が注目されている。この熱処理は疲労強度、耐摩耗性が高い点で有用であるが、硬化層が浅い点が懸念される。

本研究では浸炭焼入れ処理ならびにガス軟室化処理におけるピッチングの発生メカニズム解明を目的として、転がり疲労摩耗試験を行い、各熱処理が耐ピッチング性に与える影響を調査した。

## 2. 実験方法

## 2.1 三円筒摩擦試験機を用いた疲労試験

転がり疲労摩耗試験には、三円筒摩擦試験機（MPT-3000, R-tec Instruments, US）を用いた。Figure 1 に試験装置の概略図を、Table 1 に試験条件を示す。試験片は全て SCM420 製で、リングは浸炭焼入れ処理、ローラは 2 種の熱処理それぞれを施したものを使用した。潤滑油には市販の E-Axle 用潤滑油を用いた。各試験片に対しすべり率、面圧を変化させ、かきあげ潤滑で計 12 種の試験を行った。また、すべての試験条件で膜厚比は 0.5 以下の境界潤滑領域であった。

## 2.2 表面形状観察

疲労試験後のローラ表面画像を白色干渉計（SMT5000, R-tec Instruments, US）により 4 か所ずつ取得した。その画像に対し、表面解析ソフトウェア（MountainsMap, Digital Surf, FR）を用いて平面化処理を行い、粗さの計測ならびに疲労損傷面積割合（Damage area percentage, DAP）の算出を行った。なお、各試験片における二乗平均平方根粗さ  $S_q$  の 3 倍をしきい値とし二値化を行い、ピッチング深さ相当の領域を黒色で表した。

## 2.3 断面観察

内部損傷を調査するため、ローラをワイヤ放電加工機（AG400L, Sodick, JP）によって切断し、走査電子顕微鏡（TM3030Plus, Hitachi High-Tech, JP）を用いて断面観察を行った。

## 2.4 X 線残留応力測定

X 線残留応力測定装置（ $\mu$ -X360s, PULSTEC, JP）を用いて、疲労試験後のローラの残留応力を調査した。測定はしゅう動面の回転方向に対して 2 回行い、平均化した。

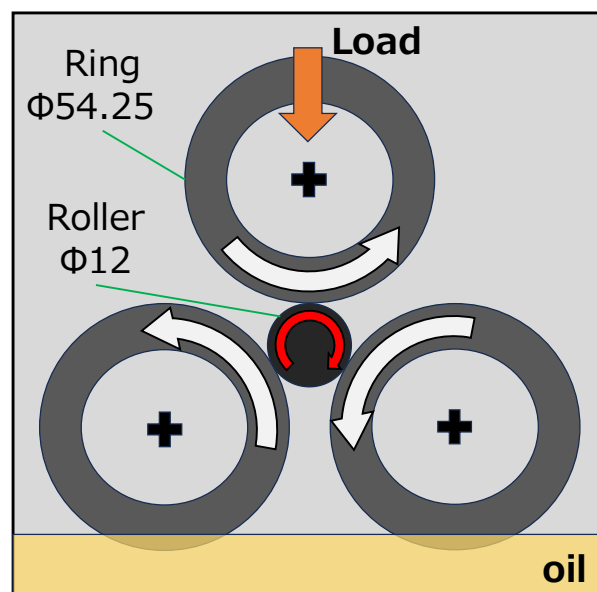


Fig. 1 Schematic diagram of MPT-3000..

Table 1 The condition of fatigue friction test

Maximum Hertzian pressure, GPa	1.3, 2.6
Lubricant temperature, °C	60
Lubricant volume, mL	90
Lubricant kinematic viscosity, mm <sup>2</sup> /s	6.88
Entrainment speed, m/s	3.0
Slide-roll-ratio (SRR), %	-5, -2, 0
Test duration, h	3
Contact cycle	$2.6 \times 10^6$
Hardness, HV	800
Surface roughness (Roller, $S_q$ ), $\mu\text{m}$	0.3
Surface roughness (Ring, $S_q$ ), $\mu\text{m}$	0.5

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 表面および断面観察

Figure 2, 3, 4 に、すべり率変化に対する DAP, 二乗平均平方根高さ  $S_q$  ならびに最大谷深さ  $S_v$  の結果を示す。Figure 2 より、すべり率 0%において、浸炭焼入れ処理の DAP の方が小さい一方、すべり率-2%、-5%においては、浸炭焼入れ処理の DAP の方が大きいことが確認された。また、すべり率の増加に伴い、浸炭焼入れ処理の場合は DAP,  $S_q$ ,  $S_v$  が増加した一方で、ガス軟窒化処理の場合は DAP,  $S_q$ ,  $S_v$  が減少すること確認された。このことから、すべり条件下において、浸炭焼入れ処理では、耐疲労摩耗・耐すべり摩耗特性が低下し、ガス軟窒化処理では、耐疲労摩耗および耐すべり摩耗特性が向上することがわかった。

Figure 5, 6 に、面圧 2.6 GPa/すべり率-2%の条件における各熱処理のローラの断面形状を示す。ここで、Fig. 5, 6 中の矢印は試験中のしゅう動方向を示している。Figure 5 より、浸炭焼入れ処理試験片において、15  $\mu\text{m}$  程度の深いき裂が発生していることがわかった。一方で、ガス軟窒化処理試験片の場合は、深いき裂の発生は確認されず、細かく割れた表面損傷が観察された。

#### 3.2 残留応力の変化

Figure 7 に摩擦試験後のローラ表面の残留応力のグラフを示す。負の値は、圧縮残留応力であることを表している。Figure 7 より、接触面圧に関わらず、すべり率の増加に伴い各熱処理で圧縮残留応力が減少することがわかった。圧縮残留応力には、き裂の進展を抑制する効果がある<sup>(1)</sup>ため、圧縮残留応力の低下は、き裂の発生・進展の抑制効果を低下させるものと考えられる。浸炭焼入れ処理において、すべり率の上昇に伴う圧縮残留応力の低下ならびに  $S_v$ , DAP の増加が確認されたことから、浸炭焼入れ処理では、き裂の発生・進展の抑制効果を持つ圧縮残留応力の低下に伴い、DAP が増加したのと考えられる。

#### 3.3 熱処理の影響

ガス軟窒化処理では、浸炭焼入れ処理と比較して、き裂の進展が抑制されることがわかった。これは、ガス軟窒化処理の  $\epsilon$  層と  $\gamma'$  層からなる約 10  $\mu\text{m}$  の化合物層に起因するものと考えられる。 $\epsilon$  層は化合物層の最表面に存在する  $\text{Fe}_2\text{-}_3\text{N}$  の組成をもつ脆い層、 $\gamma'$  層は  $\epsilon$  層の下に存在する  $\text{Fe}_4\text{N}$  の組成をもつ緻密層のことであり<sup>(2)</sup>、 $\gamma'$  層の役割によりしゅう動部品の疲労強度が向上することが報告されている<sup>(3)</sup>。今回のガス軟窒化処理の試験後表面においては、 $S_v$  値が化合物層の厚みを下回っていたことから、化合物層が表面に残存していると考えられる。また、すべり率の増加に伴い、DAP が低下した。これは、 $\epsilon$  層は脆い層であることから、化合物層が耐疲労摩耗特性に優れたなじみ表面を形成したものと考えられる。なお、 $\epsilon$  層が除去された箇所においても、緻密層である  $\gamma'$  層が存在することで、き裂進展の抑制効果を発揮したと考えられる。一方で、純転がり条件においては、すべりがなく  $\epsilon$  層におけるなじみ面の形成がなされないため、 $\epsilon$  層の脆さ故に試験中に表面から損傷部が脱離し、DAP が増加したものと考えられる。

浸炭焼入れ処理は硬化層が深いため、特に高面圧時でガス軟窒化処理よりも耐ピッチング性に優れるものと想定されたが、すべり率増加とともに DAP が増加する傾向が確認された。

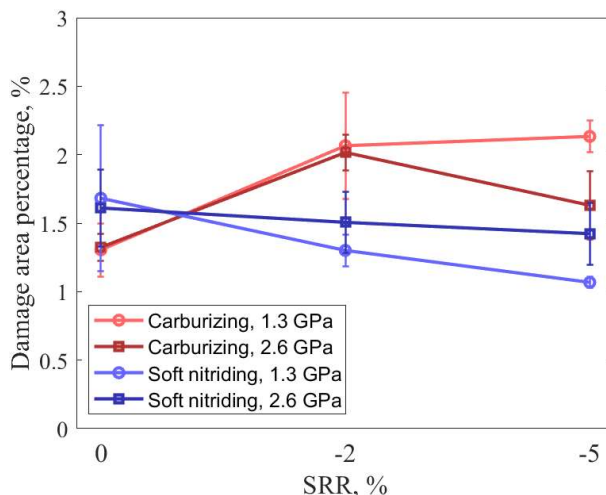


Fig. 2 Damage area percentage

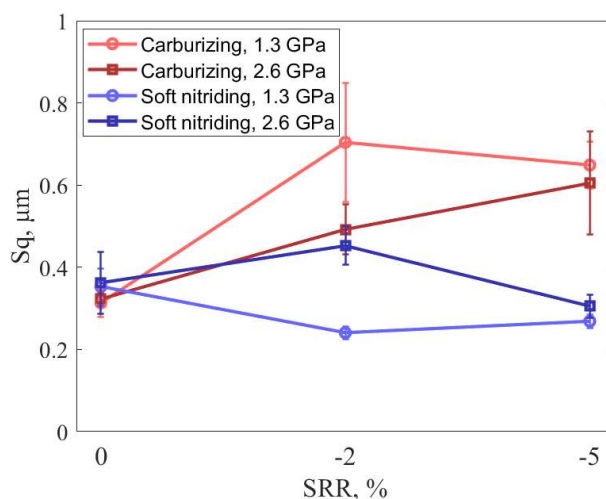


Fig. 3 Surface roughness ( $S_q$ )

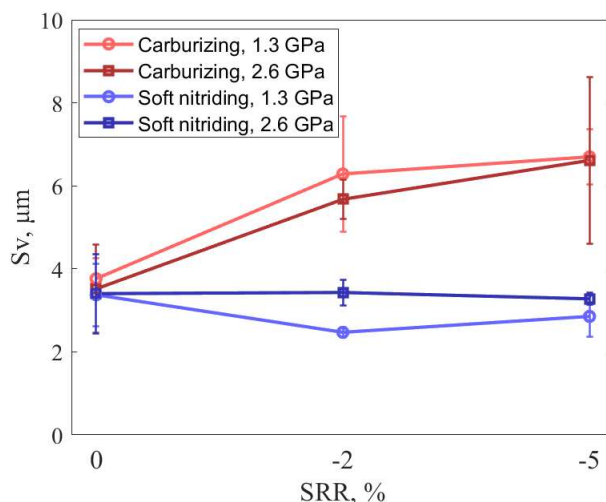


Fig. 4 Surface roughness ( $S_v$ )

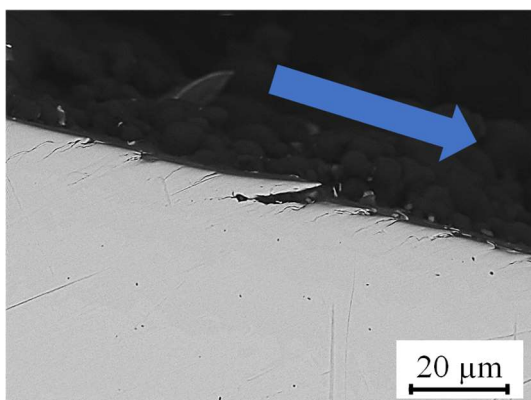


Fig. 5 Images of cross section (carburizing)

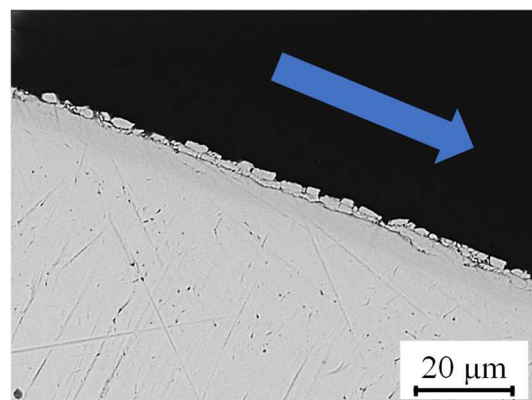


Fig. 6 Images of cross section (Soft nitriding)

これは、すべり率増加とともに、表面損傷が蓄積されたためであると考えられる。繰り返し応力下において、疲労損傷は局所的な応力発生が材料に塑性変形を起こすことでクラックが発生することが報告されている<sup>(4)</sup>。摩擦面を微視的に見た場合、二面は真実接触部で接触しており、真実接触部では局所的に高い応力が発生している。そのため、しゅう動に伴って表面の真実接触部で塑性変形が逐次的に進行し、ある段階で変形に耐えられずき裂が発生したものと考えられる<sup>(5)</sup>。また、摩擦によるせん断応力の大きい高すべり条件においては、き裂の進展が早く DAP が大きくなったと考えられる。

Figure 8 に、上述の考察に基づく各熱処理における疲労損傷のメカニズムを示す。残留応力と DAP の関係より、浸炭焼入れ処理では、すべりの上昇とともに圧縮残留応力が低下することでき裂の進展が促進され、疲労摩耗面積が増加した。一方、ガス軟窒化処理では、すべりの上昇とともに圧縮残留応力の低下が確認されるものの、なじみ面の形成により圧縮残留応力の低下が抑えられた。ガス軟窒化処理表面に存在する  $\epsilon$  相と  $\gamma'$  相の二層構造に起因するなじみの形成が、すべりの上昇に伴うき裂進展の抑制効果を発揮したものと考えられる。

#### 4. 結言

浸炭焼入れ処理ならびにガス軟窒化処理におけるピッチングの発生メカニズム解明を目的として、転がり疲労摩擦試験を行い、各熱処理が耐ピッチング性に与える影響を調査した結果、以下の知見を得た

- (1) 疲労損傷面積は、純転がり接触時では浸炭焼入れ処理がガス軟窒化処理よりも小さく、すべり条件下では逆の結果となった。
- (2) 圧縮残留応力は、すべり速度が大きくなるにつれて小さくなる傾向が確認された。
- (3) 浸炭焼入れ処理の場合は、圧縮残留応力の低下がき裂の進展を促進し、疲労損傷面積の増加が引き起こされたと考えられる。
- (4) ガス軟窒化処理の場合は、なじみ面の形成により圧縮残留応力の低下が抑えられ、耐疲労摩耗特性が向上したと考えられる。

#### 文献

- 1) 森影・伊木・大井・城・村上・後藤：疲労き裂進展抑制に及ぼす圧縮残留応力の影響，日本船舶海洋工学会講演会論文集，20, 2, (2015) 495
- 2) 梅田・宮部：窒化ポテンシャル制御を適用した窒化処理の生産技術開発，KOMATSU TECHNICAL REPORT, 60, 167, (2014) 18.
- 3) 小鯛：自動車部品の熱処理の現状・課題・今後-クランクシャフト（窒化），熱処理, 63, 5, (2023) 279.
- 4) 中村：金属疲労の基礎知識，鑄造工学，79, 2, (2007) 58
- 5) D. Mallipeddi, M. Norell, V.M. Subbaramaiah Naidu, X. Zhang, M. Naslund & L. Nyborg: Micropitting and microstructural evolution during gear testing -from initial cycles to failure, Tribology International, 156, 5, (2021) 106820

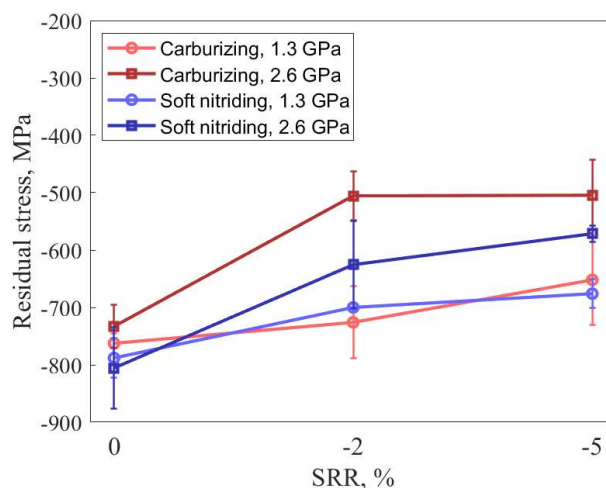


Fig. 7 Residual stress

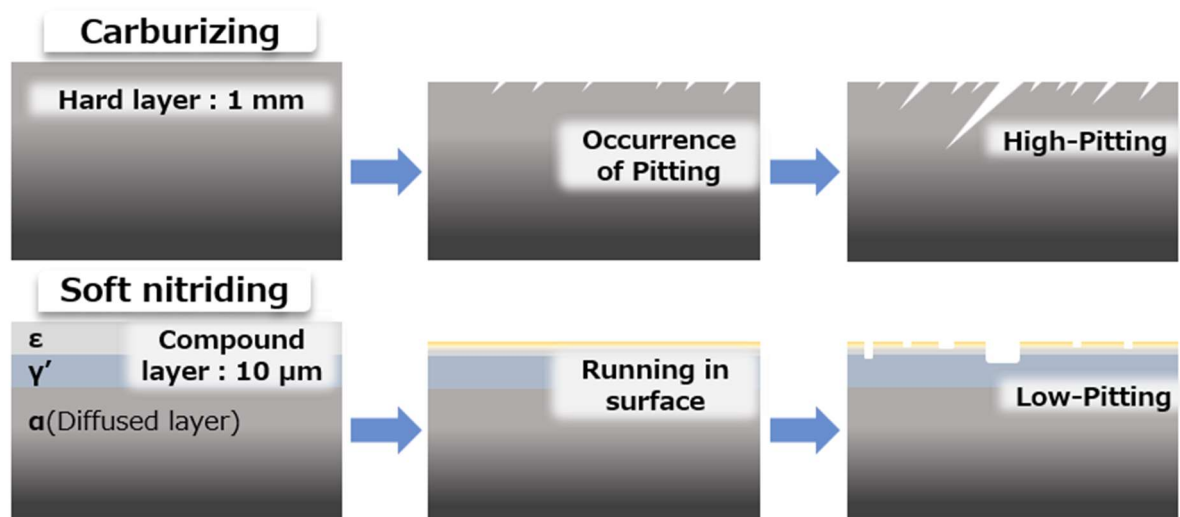


Fig. 8 Mechanism of fatigue wear by carburizing and soft nitriding at rolling and sliding conditions