ラジカル窒化ステンレス鋼 SUS440C 歯車のスコ어링強さ*

灘 野 宏 正^{*1}, 中 迫 正 一^{*1}, 河 野 正 来^{*1}
野 田 善 友^{*2}, 深 田 一 徳^{*3}

Scoring Resistance of Radical Nitrided Stainless Steel SUS440C Spur Gears

Hiromasa NADANO, Masakazu NAKASAKO^{*4}, Masaki KOHNO,
Yoshitomo NODA and Kazunori FUKADA^{**} Department of Mechanical Engineering, Kure National College of Technology,
2-2-11 Aga-minami, Kure-shi, Hiroshima, 737-8506 Japan

To clarify the effect of the radical nitriding treatment on the scoring resistance of stainless steel SUS 440 C spur gears, scoring test was carried out under forced lubrication using a power-circulating gear test rig. From the test, the following results were obtained. (1) The scoring resistance of the gear pairs in which both the pinion and the wheel were nitrided (gear pair R-R) and/or only pinion was nitrided (gear pair R-N) was 1.8~2 times as large as that of the gear pair without nitriding (gear pair N-N). However, for the case of the gear pair in which only wheel was nitrided (gear pair N-R), the effect of the radical nitriding treatment on the scoring resistance of the gears was small. (2) The values of critical surface temperature at the incipient stage of scoring for gear pairs R-R and R-N were higher than 797°C, and these were at least 256°C as high as that for gear pair N-N. (3) The sound pressure level for gear pair R-R was about 4~5 dB as lower as that of the gear pairs R-N, N-R and N-N.

Key Words: Gear, Scoring Resistance, Radical Nitriding, Stainless Steel, Power-Circulating Gear Test Rig

1. 緒 言

耐食性・耐酸化性に富むステンレス鋼歯車は、食品加工や化学プラント等の動力伝達部に数多く使用されている。しかしながら、ステンレス鋼歯車の場合、歯面上に発生した摩擦熱の拡散性が悪く、しかも硬さが低いために凝着摩耗やスコ어링が発生しやすい。したがって、機械的・熱的特性の良好な被膜処理などによる歯面の改質が重要視されている。

ラジカル窒化処理⁽¹⁾は、従来のガス窒化、塩浴窒化と比べ公害性の問題が少ない窒化法である。また、イオン窒化と比べ、複雑な形状を持つ部材への適用が可能で、表面における化合物層生成の制御が可能であり、窒化処理に伴う表面の荒れがないなど多くの長所を有している。特に歯車に対して適用する場合には、歯面の表面粗さを増加させることなく表面硬化が行えるため、非常に有用であると考えられる。この分野に関す

る研究として、三輪らの回転曲げ疲労試験機および油圧サーボバルサーによるイオン窒化処理歯車の歯の曲げ疲労強度に関する研究⁽²⁾や、B.Podgornikらのプラズマ窒化処理鋼に対するピンオンディスク試験機による摩耗特性に関する研究⁽³⁾がある。しかしながら、ラジカル窒化処理ステンレス鋼歯車に対するスコ어링強さに関する研究は見当たらない。

著者らは、既にラジカル窒化処理を施したステンレス鋼SUS440C焼入れ円筒の場合について焼付き試験を行っており、ラジカル窒化処理を施した低速側円筒(滑り率が負)・高速側円筒(滑り率が正)および低速側円筒のみラジカル窒化処理した場合の焼付き荷重は未処理同士の場合の5倍以上になることを明らかにした⁽⁴⁾。また、歯車の場合のスコ어링による歯面損傷は、瞬間温度上昇の最高値が現れるかみ合い位置(小歯車の歯元の面:滑り率が負)に発生するため、小歯車にラジカル窒化処理を施し、小歯車側歯面の機械的強度を向上させることにより、スコ어링に対する負荷性能の向上が期待できる。したがって、本研究では、ラジカル窒化処理同士の歯車対、未処理同士の歯車対、大、小歯車のいずれか一方にラジカル窒化処理を施した歯車対の4種類の組合せについてスコ

* 原稿受付 2001年3月26日。

^{*1} 正員, 呉工業高等専門学校(〒737-8506 呉市阿賀南2-2-11)。^{*2} 学生員, 呉工業高等専門学校。^{*3} 正員, 鋼鉄工業(株)(〒744-0011 下松市大字西豊井1394)。
E-mail: nakasako@kure-nct.ac.jp

リング試験を行い、各歯車対のスコ어링に対する負荷性能を明らかにした。

2. 試験方法

2.1 試験歯車 表1に試験歯車の諸元を示す。歯車材としては、マルテンサイト系ステンレス鋼 SUS440Cを使用し、1050℃で油焼入れ後、180℃で焼戻した。熱処理後には、ライスハウア研削を行っており、歯形の精度はJIS1級に仕上げられている。この場合の大、小歯車の歯形方向に沿った歯面粗さ（自乗平均平方根粗さ）の平均値は約 $0.65\mu\text{m}R_{rms}$ ($2.6\mu\text{m}R_y$ ：最大高さ)である。また、歯面のマイクロビッカース硬さは約580HVである。

歯面を研削した後、図1に示す条件下でラジカル窒化処理を行った。窒化処理後の大、小歯車の歯形方向に沿った歯面粗さの平均値は約 $0.7\mu\text{m}R_{rms}$ ($2.8\mu\text{m}R_y$)であり、窒化処理前の歯面粗さと比べて僅かに増加した。なお、歯面の色は窒化処理前と変らなかった。

図2に窒化処理を施した歯車の歯の断面のEPMAによる計測結果を示す。図2 (a)はSEM像を示し、歯

面上には $5\sim 8\mu\text{m}$ の窒化硬化層が観察される。図2 (b)は図2 (a)の中央部におけるCr, FeおよびNの線分析結果を示す。表面下約 $10\mu\text{m}$ の間にはCrおよびNの元素が増加し、逆にFeの元素は減少していることがわかる。また、窒化硬化層のX線回折では、CrNが観察された。

図3は窒化処理後の歯のピッチ点付近の断面上のマикроビッカース硬さ（測定荷重： $0.0245\text{N}\sim 0.98\text{N}$ ）の分布を示す。歯面上の硬さは約1200HVであり、歯の中央の硬さと比べて著しく高い。スコ어링強さに及ぼす窒化処理の有無の影響を検討するため、表2に示すように、窒化処理同士の歯車対、未処理同士の歯車対、大、小歯車のいずれか一方にラジカル窒化処理を施した歯車対の4種類の組合せについて実験を行った。

2.2 スコ어링試験 表3にスコ어링試験条件を示す。試験は動力循環式歯車試験機⁽⁵⁾を用いて、小歯車の回転数を6000rpm一定とし、荷重漸増式で行った。この場合、歯車の有効歯幅は7mmとした。

Table 1 Specification of test gears

			Pinion	Wheel
Number of teeth	z	—	18	40
Center distance	mm		116	
Module	m	mm	4	
Pressure angle	α_0	deg	20	
Face width	B	mm	10	
Effective face width	B_f	mm	7	
Backlash	S_n	mm	0.25	
Pitch circle diameter	d_0	mm	72	160
Outside diameter	d_1	mm	80	168
Length of action	l	mm	19.15	
Contact ratio	ϵ	—	1.62	
Tooth profile			Standard

Fig. 1 Nitriding condition

(a) SEM image

(b) Line analysis of Fe, Cr and N

Fig. 2 SEM image and line analysis due to EPMA below the surface of radical nitrided gear

各荷重段階における単位歯幅当たりの歯面垂直荷重 P_n については、歯面上の瞬間温度上昇 θ_f の計算値の最高値が約10℃(P-1)から約250℃(P-13)まで約20℃ずつ上昇するように設定した。なお、瞬間温度上昇の最高値は、かみ合い開始点である小歯車の歯元と大歯車の歯先のかみ合い位置に現れる。

瞬間温度上昇の計算には三次元熱流の場合の放物線状移動熱源による温度上昇式⁽⁶⁾を用いた。かみ合い歯の荷重分担率は石川の歯のたわみ式⁽⁷⁾を用いて、たわみ量の和の逆数より求めた。SUS440C材の機械的、熱的定数値に関しては、縦弾性係数 $E=206\text{ GPa}$ 、ポアソン比 $\nu=0.3$ 、熱伝導率 $K=29.27\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ 、熱拡散率 $\kappa=7.38\times 10^{-6}\text{ m}^2/\text{s}$ とした⁽⁸⁾。

歯面の摩擦係数は $\mu=0.1V_p^{-0.2}$ (V_p : ピッチ点の周速度 m/s)⁽⁹⁾を用いた。本実験の場合では、 $\mu=0.0536$

Table 2 Combinations of test gears

Symbol	Pinion	Wheel
N - N	-	-
R - N	Radical nitriding	-
N - R	-	Radical nitriding
R - R	Radical nitriding	Radical nitriding

Table 3 Experimental conditions in gear tests

Rotational speed of pinion	n_1	rpm	6000
Peripheral velocity at pitch point	V_p	m/s	22.6
Test range (Load range)			P-1 ~ P-13
Normal load per unit face width for each load ranges	P_n	N/mm	8.9 ~ 639.3
Hertzian contact stress at pitch point for each load ranges	p_0	GPa	0.19 ~ 1.65
Running time for each load ranges	t	min	10
Oil temperature	θ_0	℃	40±2

Fig. 3 Variation in Vickers microhardness of tooth against depth from surface

となる。なお、本摩擦係数 $\mu=0.0536$ は、スコ어링試験の各荷重段階を設定するために使用し、後述する瞬間温度上昇 θ_f の計算には、既報⁽⁴⁾の二円筒試験における実測値を用いた。

潤滑油としては、無添加タービン油ISO-VG46を用い、歯車対のかみ込み側に吹き付けた。吹き付け位置における油温は $40\pm 2^\circ\text{C}$ 、油量は 0.2 L/min にした。

スコ어링の判定は、各試験段階終了後における肉眼観察に加え、運転中における大歯車の本体温度、飛散潤滑油温度、音圧レベルおよび歯車箱の振動加速度の測定により行った。なお、スコ어링が発生した場合には、特に大歯車の本体温度が急激に上昇するため、スコ어링の判定は容易であった。

大歯車の本体温度に関しては、歯の側面のピッチ円上の中央に直径2.5mm、深さ3.5mmの穴をあけて熱電対(Kタイプ)を埋め込み、スリップリングにより熱起電力を取り出して測定した。飛散潤滑油温度は、小歯車中心に対するかみ合い位置の180°反対側の歯先面より約1mm離れた位置に熱電対(Kタイプ)を設置して測定した。

音圧レベルは、試験歯車箱正面の中央から約20cm離れた位置に、コンデンサマイクロホンを設置して、精密騒音計(C特性)を用いて測定した。歯車箱の振動加速度は、試験歯車箱の側面に圧電型加速度検出器を設置して測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 スコ어링強さ 図4は各歯車対のスコ어링発生時の単位歯幅当たりの歯面垂直荷重 P_n を表す。大、小歯車が未処理の歯車対N-Nの場合では、

Fig. 4 Scoring resistance of gear pairs

段階P-8 ($P_n=322.8\text{N/mm}$) でスコ어링が発生した。小歯車のみラジカル窒化処理した歯車対R-Nの場合には、試験機の負荷容量の限界である段階P-13 ($P_n=639.3\text{N/mm}$) においてもスコ어링が発生しないため、試験を中止した。一方、大歯車のみラジカル窒化処理した歯車対N-Rの場合には、段階P-9 ($P_n=381.6\text{N/mm}$) でスコ어링が発生しており、スコ어링強さに及ぼすラジカル窒化処理の効果は小さい。また、大、小歯車を窒化処理した歯車対R-Rの場合では、段階P-12 ($P_n=571.8\text{N/mm}$) でスコ어링が発生した。このように、小歯車にラジカル窒化処理を施した場合では、未処理の場合に比べてスコ어링強さは約1.8~2倍以上向上することが明らかになった。

この現象は、スコ어링発生的重要原因である瞬間温度上昇の最高値が発生するかみ合い位置とその位置における滑り率の符号に起因することが考えられるため、これらの関係について検討する。

図5はスコ어링が発生した荷重段階におけるかみ合い位置に発生する瞬間温度上昇 θ_f の計算値と大、小歯車の滑り率 ε_1 , ε_2 の変化を示す。

摩擦係数に関しては、既報⁽⁴⁾の二円筒試験の場合の滑り速度や荷重は、本歯車試験の場合とは異なるものの、ここではラジカル窒化処理を施した円筒の強制潤滑条件下における摩擦係数の実測値を使用した。各歯車対の摩擦係数 μ は、歯車対N-Nの場合は $\mu=0.083$ 、歯車対R-Rの場合は $\mu=0.074$ 、歯車対R-Nおよび歯車対N-R場合は $\mu=0.077$ とした。

各歯車対とも θ_f の最高値は小歯車の歯元（大歯車の歯先）に発生しており、後述するスコ어링発生後

の歯形の測定結果から明らかなように、スコ어링による歯面損傷が著しく現れたかみ合い位置にはほぼ一致する。この場合の小歯車の歯元の面における滑り率の値は負であるため、既報において検討した接触応力、摩擦力および熱応力が作用した場合の低速側円筒に発生する応力 σ_{xx} （接触点の移動方向をx軸とした場合の表面上の応力）の分布⁽⁴⁾から明らかなように、小歯車の歯元の面におけるヘルツ接触域の入口には引張応力が発生する。

スコ어링が発生した瞬間では、接触面上の突起部に発生した局所的な焼付きにより摩擦力が増大して、大きな引張応力（ σ_{xx} ）がヘルツ接触域の入口に発生する。この応力が材料の機械的強度を超えた場合、き裂が接触域の入口に発生し、表面下において最大せん断応力が発生する位置まで伝播して、焼付き部の近傍が掘り起されるものと考えられる。この焼付き片の一部がかみ合い歯面に移着したり、混入するなどして、アブレシブ摩耗や凝着による歯面損傷が急速に進展し、最終的なスコ어링に至るものと推定される。したがって、小歯車が未処理の歯車対N-NおよびN-Rの場合では、小歯車の表面の機械的強度が低いため、小歯車の歯元の面に発生した局所的な焼付きによる σ_{xx} の引張応力が材料の機械的強度を超えて、早期にスコ어링を発生したものと見える。しかしながら、小歯車にラジカル窒化処理を施した歯車対R-NおよびR-Rの場合では、小歯車の歯面の硬度がきわめて大きく、材料の機械的強度が向上したため、 σ_{xx} の引張応力による表面からのき裂の発生が阻止され、スコ어링が発生しにくいものと推定される。

このように、スコ어링強さの向上には、瞬間温度上昇の最高値が現れるかみ合い位置で、その位置における滑り率が負である小歯車側にラジカル窒化処理を施すことが重要である。なお、歯車対R-Rの場合にはスコ어링を生じ、歯車対R-Nの場合にはスコ어링を生じていない。これは、以下の理由によるものと考えられる。

前述のように、ラジカル窒化処理を施した場合の歯面の硬さは約1200HVであり、X線回折によれば窒化硬化層にはCrNが観察されている。著者の一人らは、既に焼入れ等による表面硬化層の熱伝導率は、未処理の場合の約1/3に低下することを明らかにしており⁽¹⁰⁾、本試験の場合においても、窒化硬化層の熱伝導率は未処理の場合と比べて低下することが推察される。したがって、歯車対R-Rの場合の θ_f は歯車対R-Nの場合のそれと比して高くなるものと考えられるため、歯車対R-Rの場合が早期にスコ어링を生じたものと考え

Fig. 5 Variation in specific sliding and flash temperature rise along the length of action at the incipient stage of scoring

られる。

また、歯車試験における小歯車側にラジカル窒化処理を施した場合のスコ어링強さは、未処理歯車同士の場合の約1.8~2倍以上であり、円筒試験における低速側円筒にラジカル窒化処理を施した場合の効果（約5倍以上）と比べて小さい。これは、円筒試験片と歯車試験片の硬さおよび表面粗さの違いや、円筒試験と歯車試験における運転条件の違いにより、歯車試験の場合の接触面上の油膜形成状態が、円筒試験の場

合と異なることに起因するものと考えられる。

3・2 歯面の状態 一例として、試験前と最終荷重段階におけるスコ어링が発生した歯車対N-NおよびR-Rの場合の歯形方向（歯幅中央）および歯幅方向（歯先から1mm内側）の歯面粗さを図6および図7に示す。歯車対N-Nの場合では、小歯車の1歯かみ合い開始点付近の損傷が著しく、大歯車では歯面全域にスコ어링損傷が発生しており、図5に示す瞬間温度上昇の最高値が現れるかみ合い位置とスコ어링

p : Pitch point
a~b, c~d : Double tooth contact
b~c : Single tooth contact

(a) Tooth profile

(b) Surface roughness along tooth trace

Fig. 6 Tooth profile and surface roughness along tooth trace of gear pair N-N

p : Pitch point
a~b, c~d : Double tooth contact
b~c : Single tooth contact

(a) Tooth profile

(b) Surface roughness along tooth trace

Fig. 7 Tooth profile and surface roughness along tooth trace of gear pair R-R

による損傷の著しい位置は若干異なる。これは、2歯かみ合いの開始点では動荷重が発生するため歯面温度が上昇し、スコアリングが発生したものと考えられる。一方、歯車対R-Rの場合では、 θ_f の最高値が現れる小歯車の歯元と大歯車の歯先付近の損傷が著しく、特に大歯車の場合には、深さが約 $30\mu\text{m}$ の損傷が歯幅方向の一部に発生した。

図8は図7に示す歯車対R-Rの大歯車の場合の歯面損傷が発生した表面とその位置におけるかみ合い点の移動方向に直角な断面のEPMAによる計測結果を示す。図8(a)では、スコアリングによる掘り起しがかみ合い点の移動方向に沿って生じる。しかしながら、その周辺の歯面上には研削条が観察されており、ラジカル窒化層が残留していることがわかる。図8(b)は図8

Fig. 8 SEM image of scored tooth face of wheel of gear pair R-R

(a) においてスコアリングによる損傷の著しい場所②と軽微な場所①における断面の状況を示す。②では厚みが約 $10\sim 20\mu\text{m}$ の窒化層の破片が積層し、その下には空隙が観察される。また、①では厚みが約 $5\mu\text{m}$ の窒化層の破片の残留が観察され、空隙の厚みは②の場合に比べて小さい。

3.3 本体温度、飛散潤滑油温度およびスコアリング臨界温度

荷重段階における終了直前（スコアリングが発生した場合では、その直前）の各歯車対の大歯車の本体温度 θ_b の測定値の変化を図9に示す。図9中の記号Sはスコアリングの発生により運転を停止したことを表す（以下、同様）。 θ_b は歯面荷重の増加に伴って徐々に上昇しており、歯車対の組合せによる θ_b の相違は小さい。

図10は図9の場合と同様、荷重段階における終了直前の各歯車対の飛散潤滑油温度 θ_{oil} の測定値の変化を示す。各歯車対の θ_{oil} の変化は θ_b のそれに対応する。

Fig. 9 Variation in bulk temperature of tooth of wheel against normal load

Fig. 10 Variation in fling-off oil temperature against normal load

しかしながら、最終の荷重段階における θ_{oil} は θ_b に比べて約5～10℃低い。

θ_f に及ぼす歯面粗さの影響を考慮した各歯車対のスコアリング臨界温度 θ_{cr} の計算値を図11に示す。なお、 $\theta_{cr} = \theta_b + \theta_f \times 1.27 / (1.27 - H)$ ⁽¹¹⁾を使用し、 θ_b はスコアリング発生直前の大歯車の本体温度の測定値、 θ_f はスコアリングを発生した荷重段階における瞬間温度上昇の計算値、Hの値は図7から明らかなようにスコアリング損傷が現れていない歯面の粗さは試験前の粗さに比べて変化は小さいので、試験前の大、小歯車の歯形方向の歯面粗さ R_{rms} の平均値とした。

未処理同士の歯車対N-Nの場合の θ_{cr} は約541℃、窒化処理同士の歯車対R-Rの場合の θ_{cr} は約797℃となり、ラジカル窒化処理により歯車のスコアリング臨界温度は約256℃上昇する。一方、大歯車のみ窒化処理を施した歯車対N-Rの場合の θ_{cr} は約594℃となる。また、小歯車のみ窒化処理を施した歯車対R-Nの場合の θ_{cr} は約860℃以

上であり、この場合のスコアリング臨界温度は歯車対の内、最も高い。

3・4 歯車騒音および歯車箱の振動加速度 図12は荷重段階の上昇に伴う各歯車対の音圧レベル（全騒音を表す）の変化を示す。運転初期の荷重段階2、3の場合を除いて、各歯車対の音圧レベルは荷重段階の上昇に伴って増加する。また、歯車対R-Rの場合の音圧レベルは他の歯車対のそれに比べて4～5dB低く、全ての試験段階において澄んだ全騒音が発生しており、他の歯車騒音と比して音質が異なった。これは、硬い表面同士が接触することにより、他の歯車対の場合と比較して異なった傾向を示したものと考えられる。

図13に荷重段階の上昇に伴う歯車箱の振動加速度 α の変化を示す。各歯車対とも荷重段階の上昇に伴って α は増加するが、歯車騒音の増加傾向とは異なる。また、スコアリング発生前の荷重段階から α は増加する傾向が認められる。

4. 結 言

ラジカル窒化処理同士の歯車対、未処理同士の歯車対、大、小歯車のいずれか一方にラジカル窒化処理を施した歯車対の4種類の組合せについて動力循環式歯車試験機を使用してスコアリング試験を行った結果、以下のことが明かになった。

(1) 小歯車にラジカル窒化処理を施した場合には、未処理の場合に比べてスコアリング強さは約1.8～2倍以上向上する。

(2) 未処理同士の歯車対N-Nの場合の θ_{cr} は約541℃、窒化処理同士の歯車対R-Rの場合の θ_{cr} は約797℃である。一方、歯車対N-Rの場合の θ_{cr} は約594℃、歯車対R-Nの場合の

Fig. 11 Critical surface temperature at the incipient stage of scoring

Fig. 12 Variation in sound pressure level against normal load

Fig. 13 Variation in acceleration of gear box against normal load

θ_{cr} は約860℃以上であり、この場合のスコ어링臨界温度は歯車対の内、最も高い。

(3) スコ어링強さの向上には、瞬間温度上昇の最高値が現れるかみ合い位置で、その位置における滑り率が負である小歯車側にラジカル窒化処理を施すことが重要である。

(4) 各歯車対の音圧レベルは荷重段階の上昇に伴って増加する。また、歯車対R-Rの場合の音圧レベルは他の歯車対のそれに比べて4～5dB低い。

文 献

- (1) 石井芳朗, ラジカル窒化と複合硬化処理, 住友金属鉱山中研所報, 技術資料, 10-2, (1995), 51-57.
- (2) 三輪能久・柴田伸也・花川勝則・生野祐治・三原孝司・迫誠夫, イオン窒化歯車の開発, マツダ技報, No. 8, (1990), 130-136.
- (3) Podgornik, B. and Vizintin, J., Wear Properties of Plasma Nitrided Steel in Dry Sliding Conditions, *Trans. ASME, J. Tribol.*, 121-3, (1999), 802-807.
- (4) 中迫正一・灘野宏正・河野正来・山下裕司・深田一徳, 二円筒試験におけるラジカル窒化ステンレス鋼の摩擦特性, 機論, 66-643, C (2000), 994-1001.
- (5) 寺内喜男・灘野宏正, スコ어링におよぼす表面あらさおよび油温の影響について, 潤滑, 20-11, (1975), 791-798.
- (6) 中迫正一, すずめつき熱拡散処理法によるステンレス鋼平歯車の歯面改質に関する研究, 学位論文, 岡山大学, (1996), 73.
- (7) 石川二郎, 動力伝達用平歯車の設計に関する基礎的研究, 東京工業大学学報, 3-2, (1957), 197-297.
- (8) 日本機械学会高温強度部門委員会編, 金属の物理定数に関する資料, (1969).
- (9) ISO/TC/WG6, Netherlands, 17, *Calculation of Scoring Resistance of Gear Drives*, (1975).
- (10) 寺内喜男・宮尾義治・灘野宏正, 表面硬化歯車の瞬間歯面温度上昇について (第1報, 表面硬化層の熱伝導率による影響), 機論 (第3部), 39-317, (1973), 404-414.
- (11) Terauchi, Y. and Nadano, H., Effect of Tooth Profile Modification on the Scoring Resistance of Spur Gears, *Wear*, 80, (1982), 27-41.