807 高周波焼入れ歯車の曲げ疲労強度に及ぼす加熱時間、加熱電力および周波数の影響

Effects of Heating Time, Electric Power and Frequency on Bending Fatigue Strength of Induction Hardened Gears

○ 正 宮 近 幸 逸 (鳥取大・工) 織 田 一 輝 (鳥取大[院])
伊 能 日出男 (電気興業) 片 沼 秀 明 (電気興業)
正 岩 永 淳 (電気興業) 正 小 出 隆 夫 (鳥取大・工)
名 小 田 哲 (福山大・工) 難 波 千 秋 (鳥取大・工)

Kouitsu MIYACHIKA
Kazuteru ODA
Hideo INOU
Hideaki KATANUMA
Jun IWANAGA
Takao KOIDE
Satoshi ODA
Chiaki NAMBA

Tottori University, 4-101 Minami, Koyama-cho, Tottori
Graduate School of Eng., Tottori University
Denki Kogyo Co., Ltd., 4502-1 Nakatsu, Aikawa-cho, Aikou-gun
Denki Kogyo Co., Ltd.
Denki Kogyo Co., Ltd.
Tottori University
Fukuyama University, Sanzo 1, Gakuen-cho, Fukuyama
Tottori University

Key Words: Gear, Induction Hardening, Bending Fatigue Strength, Hardened Layer, Heating Time, Electric Power, Frequency, Case Depth

1. 緒 言

前報^{(1)~(5)}では、高周波焼入れ歯車の残留応力と硬化層を予測する高周波焼入れシミュレータを作成し、これを用いて歯車の種々の高周波焼入れシミュレーションを行うとともに曲げ疲労試験を行って、残留応力と硬化層に及ぼす加熱時間、加熱電力および周波数の影響、曲げ疲労強度に及ぼす加熱時間の影響などについて明らかにした。

本報では、S35CおよびS45C高周波焼入れ歯車の硬化層および硬さ測定を行うとともに、曲げ疲労試験を行って、硬化層および曲げ疲労強度に及ぼす加熱時間、加熱電力および周波数の影響などについて明らかにしている。

2. 実験方法および実験装置

2.1 試験歯車 本実験に用いた試験歯車の主諸元は、モジュール $m=4$ 、基準圧力角 $\alpha_0=20^\circ$ 、歯数 $z=18$ 、歯幅 $b=10\text{mm}$ で、それらの歯車記号、材料および加熱条件を表1に示す。図1は、試験歯車の高周波焼入れに用いた加熱コイルと歯車の形状・寸法を示す。歯車材料は、S35CとS45C、コイル材料は銅である。

2.2 硬化層の測定 図1に示す高周波焼入れ時の加熱コイルと歯車の配置における歯車の上側側面(Gear-side U)、下側側面(Gear-side L)、歯幅中央断面(Section M-M)の歯の側面および歯形中心面(Section A-A)をバフ研磨した後、希

硝酸で腐食させて硬化層の観察および写真撮影を行った。

2.3 硬さ測定 試験歯車の Gear-side U, Gear-side L, Section M-M における歯元すみ肉部 Hofer の危険断面位置の歯面垂直方向の硬さ測定を行い、有効硬化層厚さを求めた。

2.4 組織観察 試験歯車の Gear-side U, Gear-side L, Section M-M における歯元すみ肉部接線角度 $\theta=30^\circ$ (θ : 歯の中心線と歯元すみ肉曲線の接線のなす角) の Hofer の危険断面位置の歯面付近と歯面から離れた位置の金属顕微鏡による組織観察を行った。

Fig. 1 Dimensions of heating coil and gear

Fig. 2 Macro-structures of gear tooth (S35C, $P=100\text{kW}$, $f=30\text{kHz}$)

Table 1 Heating conditions of test gears

Gear sign	Material	Heating condition		
		Electric power P kW	Frequency f kHz	Heating time t_h s
G3N*	S35C	100	30	0.8
G3B1				1.0
G3B2				1.2
G3B3				1.5
G3B4				1.8
G3B5				2.0
G3C1		60	30	0.8
G3C2				1.0
G3C3				1.2
G3C4				1.5
G3D1		50	30	2.8
G3D2				3.3
G3D3				3.8
G4B1	S45C	100	30	0.8
G4B2				1.0
G4B3				1.2
G4C1		60	30	0.8
G4C2				1.0
G4C3				1.2

Fig. 3 Macro-structures of gear tooth (S35C, $P=100\text{kW}$, $f=60\text{kHz}$)

(a) $P=100\text{kW}$, $f=30\text{kHz}$

Fig. 4 Macro-structures of gear tooth (S35C, $P=50\text{kW}$, $f=30\text{kHz}$)

(b) $P=100\text{kW}$, $f=60\text{kHz}$

Fig. 6 Bending fatigue limit loads P_m (S35C, S45C)

(c) $P=50\text{kW}$, $f=30\text{kHz}$

Fig. 5 S-N curves (S35C)

2.5 曲げ疲労試験 表1に示す試験歯車に対して、ディーゼルエンジンの燃料噴射ポンプを利用した油圧式曲げ疲労試験機⁽⁶⁾を用いて曲げ疲労試験を行った。本試験機による荷重繰返し数は、670回/分である。

3. 実験結果および考察

3.1 硬化層の測定結果

3.1.1 加熱時間の影響 図2は、表1に示す歯車G3B1~G3B5 (加熱電力 $P=100\text{kW}$, 周波数 $f=30\text{kHz}$) のマクロ腐食写真を示す。図2より硬化層は、加熱時間 t_h が短い場合には歯幅中央歯先端と歯幅端歯底付近から生じ、時間の経過とともに歯形に沿って生じるが、さらに t_h が増加すると歯全体が硬化層で覆われることがわかる。

3.1.2 周波数の影響 図3は、G3C1~G3C4 ($P=100\text{kW}$, $f=60\text{kHz}$) のマクロ腐食写真を示す。図3より t_h の増加にともなう硬化層の変化は、 $f=30\text{kHz}$ の場合(図2)と同様な傾向を示すが、 $f=60\text{kHz}$ の場合のほうがHoferの危険断面付近で硬化層が厚くなることわかる。

3.1.3 加熱電力の影響 図4は、G3D1~G3D3 ($P=50\text{kW}$, $f=30\text{kHz}$) のマクロ腐食写真を示す。図4より P が小さくなると t_h がかなり大きくなるので、 P が大きい場合に比べて歯形に沿った硬化層が得難いことがわかる。

3.2 曲げ疲労強度 図5は、表1に示す歯車の曲げ疲労試験結果を、図6は、図5の結果から求めた曲げ疲労限度荷重 P_m を示す。図5中の縦軸の応力値は、会田・寺内式⁽⁶⁾に歯形の諸寸法と負荷荷重値 P_n (歯面法線荷重) を代入して計算したものである。図5、6より P_m は、いずれの材料、 P , f に対してもある t_h で最大値をもつことより、曲げ疲労限度に対する最適加熱時間が存在すること、適切な加熱条件の場合には、高周波焼入れ歯車の曲げ疲労限度荷重は、調質歯車の場合の約1.8倍にもなることがわかる。

4. 結 言

- (1) 高周波焼入れによる歯車の硬化層は、加熱時間 t_h が短すぎる場合には、歯幅中央歯先付近と歯幅端歯底付近しか生じないが、 t_h の増加とともに歯形に沿って生じ、 t_h が長くなりすぎると歯全体が硬化層で覆われる。また、加熱電力 P が大きいほうが t_h が短くなるので、 P が小さい場合に比べて歯形に沿った硬化層が得やすい。
- (2) 高周波焼入れ歯車の曲げ疲労限度荷重 P_m に対して最適加熱時間が存在し、本報では得られた最大の P_m は、調質歯車の場合の約1.8倍にもなる。

文 献 (1) 宮近・他4名, 機構論, No.025-1(2002), 379-380. (2) 宮近・他5名, 機構論, No.02-12(2002), 21-26. (3) 宮近・他5名, 機構論, No.035-1(2003), 247-248. (4) 馬田・他4名, 第56回熱処理概要集, (2003), 39-40. (5) 宮近・他6名, 第53期材料講演論文集, (2004), 258-259. (6) 会田・他1名, 機論, 32-233(1966), 137-147.