U.D.C. 620.178.162.2:621.833:621.785.545.45

歯車材の磨耗に及ぼす高周波燒入の効果

牧野亘作*箭內賢明**

The Rolling Abrasion of the Induction Hardened Steel for the Tooth Wheels

By Kōsaku Makino and Kenmei Yanai Kameari Works, Hitachi, Ltd.

Abstract

Lighter weight and longer life are becoming more and more requisite for all industrial machinery. To comply with such trend, Hitachi, Ltd. recently adopted the induction hardening for the machine parts; in the previous issue the writers published their investigation which revealed that the induction-hardened steel parts had excellent mechanical properties, attestifying the expediency of the method for manufacturing better machine parts.

This article deals with the writers' research into the toothed wheels, which are

induction-hardened in varicus degrees, applying a series of rollying abrasion test. The contents may be summarized as follows:

- (1) The allowable Hertz Pressure of test pieces could be increased to $170 \sim 200\%$, and the specific abrasion was reduced to 1/10 in the experiment. However, in combined use of hard steel and mild steel, the rolling abrasion became excessive, the fact which warns against careless use of such combination.
- (2) The results of experiments as to Hardness—Hertz Pressure—specific abrasion are shown on the three dimensional graphs. In those graphs, Hertz Pressure, specific sliding and hardness are the factors having great effect on the abrasion.
- (3) So far as the results of these experiments are concerned the relation between Hertz Pressure σ and specific abrasion y is represented by simple exprimental formula,

$y = BA^{\sigma}$

where A is constant and the value of $A=1.094\sim1.103$ was derived from the experiment.

(4) The hardened depth of those toothed wheels should be 2 mm or more.

〔I〕緒 言

あらゆる産業機械に於て軽量にして堅牢、しかも耐用 寿命の永い製品とすることは製作者としての念願である が、その目的を達成するためには部分品の諸性質を改善 せねばならない。日立製作所に於ては永年にわたり高周

* ** 日立製作所亀有工場

波焼入せる部品の疲労強度、繰返打撃強度、静的強度な どの機械的諸性質に就いて研究を行い、機械部品として 極めて好ましい性質であることを発表した。⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾

今回は主として歯車を対象にした磨耗に就いて高周波 焼入の効果を確めると共に設計資料を得る目的をもつて 研究を行つたものである。歯車に依る動力伝達の過程に 於てピニオン及びギャーの両歯面は転り接触と、滑り接

触とを繰返すために程度の差はあるが磨耗を伴う。しか し滑り接触は主として機械的磨耗の現象となり、転り接 触は応力が高いと歯面を疲労させて斑磨耗 (Pitting)を 誘発する。

この斑磨耗に就いては西原博士、福原氏、遠藤氏等或 はビスマン氏等などの著名な研究があり、(4)(5)(6)(7)日立 製作所では石田氏が卷上機の歯車の磨耗に就いて考察し たことがある。(8)(9) 高周波焼入すれば歯面の許容接触応 力を相当に高め得られることは想像されるところである が、その許容応力値並びに磨耗量を日立式高周波焼入装 置で焼入した試験片に就いて実験的に求めたので多少の 考察を加えてその結果を発表する次第である。

〔II〕 実験条件の選定

磨耗試験の結果は試験条件に依つて可成りその値を異 にするので試験を行うに当つてはなるべく実物歯車の噛 合いに近い条件にすることが望ましい。しかしあらゆる 場合を想定して実験することは困難であるから、本実験 に於ては実物歯車で実験結果を検討し易い U06 型日立 パワーショベル(0.6 m³)の歯車を対象にして磨耗試験 条件を決定した。



論





その歯車の仕様は20°高歯、10モジュール、精度2 級、歯車比 17:80,回転数比 186:39.5 r.p.m.,周速度 99.2 m/min であつて、その材質はピニオンは Ni-Cr鋼 であり、ギヤーは低 Mn 鋳鋼であつて、何れも歯面に高 周波焼入を施している。この歯車の一枚の歯の噛合い狀 況を歯の弾性撓みを考えずに純幾何学的に取扱つて、噛 合い初めより噛合い終りまでの Hertz 応力 o 及び滑り率 Sをピニオンの歯面の曲率半径に応じて算出して、その 関係を図示すれば第1図の如くである。即ち歯面に最大 応力が生ずるのはある程度に嚙合いが進行して嚙合う歯 数が最小となつたときであり、更に嚙合いが進行して次 の歯も噛合うようになると表面応力は急激に減少する。

次に滑りに就いて考えると嚙合い初め及び嚙合い終り 附近で滑りは急増し、ピッチ点では滑りを伴わない。ま た嚙合いに於ける滑り方向と接触点の移動方向との関係 は第2図に示す如く、ピニオン及びギャー共に歯本では 相反する方向に作用し、歯末では同一方向に作用するこ といなる。実際の歯面の磨耗を観察すると第2図の A, Cに対応する箇所の磨耗が多いので、本実験に於ける滑 り率は第2図の A, B, C の各点に近い値を代表的に選 んだ。

(III)実験の方法

以上の如く歯面の接触狀況は転りと滑り接触とが作用 するので、試験機は第3図に示すように2箇の円壔狀試



- 第2図 歯車の嚙合に於ける接触方向と滑り方向 の説明図
- Fig. 2. Relation of Sliding and Rolling Contact on Gear Tooth



Fig. 3. Method of Abrasion Test

歯車材の磨耗に及ぼす高周波焼入の効果

第1表供試材の化学成分

l'able 1.	Chemical	Composition	of	Test	Pieces
-----------	----------	-------------	----	------	--------

材 質	名	C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Ni (%)	Cr (%)	規 格
低 Mn 翁	寿 鋼	0.31	0.23	0.98	0.032	0.019			日立規格
Ni-Cr	鋼	0.36	0.23	0.57	0.056	0.026	2.45	0.58	SNC-2
鍛	鋼	0.42	0.14	0.31	0.035	0.019	—	0.07	SF 54

使用素材の機械的性質 (Mechanical Property of Materials in Use)

材 質	名	熱 処 理	$\sigma_B kg/mm^2$	$\sigma_S { m kg/mm^2}$	e (%)	\$ (%)	硬度 Rc
低 Mn 釒	寿 鋼	900°C A	59.8	35.8	29.6	37.7	2
Ni-Cr	鋼	850°C O.Q. 650°C O.C.	86.0	73.0	22.0	64.5	27
鍛	鋼	850°C A	53.0	31.5	26.0	47.0	2

A 燒鈍、O, Q 油中燒入、O, C 油中冷却

験片の円周面を任意の荷重で接触させ、滑りを与え乍ら 回転し得る構造の西原式転り磨耗試験機を用いた。今第 3図に於て上下両試験片の回転数をそれぞれ n_1 及び n_2 として $n_1 > n_2$ の関係にすれば、上試験片は接触方向と 滑り方向とが同一であり、下試験片は相反することゝな る。故に歯面の滑りに就いてみれば下試験片の磨擦狀態 はピニオンの歯本に相当し、上試験片はギャーの歯本の 嚙合いに相当する。またピッチ点附近の嚙合いに対応さ せるには下試験片のみを駆動し、上試験片を自由回転す る如くすればよい。

 $n_2=610$ r.p.m. 従つて $S_1 \rightleftharpoons 16\%$, $S_2 \rightleftharpoons 20\%$ となる。B 点は $n_1 \rightleftharpoons n_2 \rightleftharpoons 610$ r.p.m. とした。

この両試験片面に生ずる接触応力の算出は下記せる Hertz 氏の計算式によつたが、⁽⁶⁾ この算式は材料を純弾 性体として取扱つているので塑性変形する場合には誤差 を伴う。

871

こゝで上試験片の滑り率 $S_1 = n_1 - n_2/n_1 \times 100\%$,下試 験片の滑り率 $S_2 = n_1 - n_2/n_2 \times 100\%$ で表わすことゝす る。本実験に於てはA点に相当する条件として $n_1 = 880$.p.m., $n_2 = 610$ r.p.m. にしたので $S_1 \Rightarrow 31\%$, $S_2 \Rightarrow 44\%$ となる。 C点に相当する条件としては $n_1 = 730$ r.p.m.,



Fig. 4. Hardness Distribution in Radius Axis of Induction-Hardened Test Piece b: 接触面の幅 mm

σ: 最大圧縮応力 kg/mm²

r1, r2: 上下両試験片の半径 mm

1: 試験片の幅 mm

m1, m2: 上下両試験片のポアソン数 10/3

E₁, E₂: 上下両試験片の弾性係数 21,000 kg/mm² P: 荷重 kg

 $b = 4[2 P / \pi l E (1 - 1/m^2)]^{1/2} (1/r_1 + 1/r_2)^{-1/2} (1)$ $\sigma = 0.418 [PE/l(1/r_1 + 1/r_2)]^{1/2} \dots (2)$

> 尚潤滑は実験の対象に選んだ歯車装置 が油槽内運転であるのでモビール油 #30 を試片に滴下し乍ら試験を続行した。

> 試験片の材質は第1表に掲げる如き化 学成分並びに機械的性質を有する低 Mn 鋳鋼、Ni-Cr 鋼、鍛鋼の三種類である。 試験片は高周波焼入後 200°C 焼戻 (H, F, Q), 普通の熱処理法による焼入焼戻 (Q,T), 焼鈍(A)の各処理を行つたもの で、最後に全試験片の表面を同時にグラ インダー仕上げした。

> これら試験片を何れを上、或は下側に するかの組合せ方は主として実用的な観 点から第2表に掲げる如くに決定した。

872 昭和28年5月

日 立 評

第35卷第5号

第2表 磨 耗 試 験 片 の 組 合 せ

論

Table 2.	Combination	of	Abrasion	Testing	Pieces	
----------	-------------	----	----------	---------	--------	--

組合せ	Ŀ	試	験 片		下	試	験 片	Ŧ
番号	材 質	熱処理	硬度 Rc	滑り率 (%)	材 質	熱処理	硬度 Rc	滑り率
1	低 Mn 鋳鋼	А	2	30	Ni-Cr 鋼	Q, T	27	-44
2	低 Mn 鋳鋼	H, F, Q	45	30	Ni-Cr 鋼	Q, T H, F, Q	50	44
3	Ni-Cr 鋼	Q, T H, F, Q	50	30	Ni-Cr 鋼	Q, T H, F, Q	50	-44
- 4	低 Mn 鋳鋼	А	2	30	鍛 鋼	A	2	-44
5	低 Mn 鋳鋼	А	2	30	鍛鋼	А Н, F, Q	50	-44
6	低 Mn 鋳鋼	А Н, F, Q	45	30	低 Man 鋳鋼	A H, F, Q	45	-44
7	低 Mn 鋳鋼	А Н, F, Q	45	30	Ni-Cr 鋼	Q, T	27	-44
8	低 Mn 鋳鋼	А	2	30	低 Mn 鋳鋼	А	2	-44
9	低 Mn 鋳鋼	А	2	0	Ni-Cr 鋼	Q, T	27	0
10	低 Mn 鋳鋼	Н, F, Q	45	0	低 Mn 鋳鋼	A H, F, Q	45	0
11	低 Mn 鋳鋼	А Н, F, Q	45	0 -	Ni-Cr 鋼	Q, T	27	0
12	低 Mn 鋳鋼	А Н, F, Q	45	0	Ni-Cr 鋼	Q, T H, F, Q	50	0
13	Ni-Cr 鋼	Q,T H, F, Q	50	16	低 Mn 鋳鋼	н, F, Q	45	-20

A 焼鈍、Q,T 焼入、焼戻(調質) H,F,Q 高周波焼入

〔IV〕試験片の硬度と組織

試験片の表面硬度は第2表に記入せる如くであるが、 高周波焼入した試験片の表面より内部への硬度分布を中 央にて横断した面に就いて測定して図示すれば第4図の 如くである。同図の両試験片は同一条件で高周波焼入し たのであるが、成分が異るために表面硬度及び分布に差 があり、Ni-Cr 鋼は内部まで硬化し低 Mn 鋳鋼の硬化深 度は浅い。

顕微鏡組織は低 Mn 鋳鋼(A) はパーライト、フェラ イトの混合組織であるが、高周波焼入したものはフェラ イトが斑点の如く存在するマルテンサイト組織である。 鍛鋼(H, F, Q)には斑点はなく均一なマルテンサイトで ある。Ni-Cr 鋼(Q, T) はソルバイトであるが、高周波 焼入したものは微細なマルテンサイトであつた。

〔V〕繰返数と磨耗量

上記の如き各種の組合せに就いて磨耗試験を行った が、こゝでは代表的な二例に就いてのみ説明するに止め る。上試験片に低 Mn 鋳鋼(A),下試験片に Ni-Cr 鋼 (Q, T)とを滑り率 S₁=31%, S₂=44%, Hertz 応力 σ= 86kg/mm²で試験したときの繰返数と磨耗量との関係を **第5**図(A)に示した。この実験例では下試験片が1×10⁶



第5図(A) 繰返数と磨耗量の関係

Fig. 5. (A) Relation of Abrasion and Repeated Number at Upper Piece Low-Mn Cast Steel (Annealed) Lower Piece Ni-Cr Steel (Quenched and Temper) $\sigma = 86 \text{ kg/mm}^2$



第5図(B) 繰返数と磨耗量の関係 Fig. 5.(B) Relation of Abrasion and Repeated Number at Upper Piece Low-Mn Cast Steel (Annealed) Lower Piece Ni-Cr Steel (Quenched and Temper) $\sigma = 60 \text{ kg/mm}^2$

--122 --

歯車材の磨耗に及ぼす高周波焼入の効果





873

Hardened) $\sigma = 100 \text{ kg/mm}^2$

回近から摩擦面に斑磨耗を生じ磨耗量が急増した。かく の如くして磨耗を起さない応力を見出すまで別々の試験 片につき試験を続行した。

第5図(B)は上記と同じ組合せであるが $\sigma = 60 \text{ kg/}$ mm²にしたので3×10⁶回に至るも斑磨耗を生じなかつ た例である。第6図(A)は上記と同一材料ではあるが、上 下両試験片共に高周波焼入して $\sigma = 110 \text{ kg/mm}^2$ で試験 した例であつて、下試験片は 5×10⁵,上試験片は 7×10⁵ 回から磨耗量が急増した。第6図(B)は応力を稍々下げ て $\sigma = 100 \text{ kg/mm}^2$ にしたので磨耗量は不連続的に急増 することはなかつた。

[VI] 斑磨耗耐久限 (σ_{-g}) に就いて

以上の実験結果より各組合条件に於ける斑磨耗発生の 繰返数 $N \ge$ Hertz 応力 $\sigma \ge$ の関係を図示すれば第7 図(A)及び(B)の如くなる。図中で横軸に平行な直線の 値は丁度鋼材の疲れ限度に対応するものであるから斑磨 耗耐久限($\sigma-g$) と呼ばれている。この線図は上下両試験 片に於て斑磨耗を発生した側に就いて画いたものであつ て、斑磨耗を発生しなかつた相手側の耐久限は示してな い。同図の耐久線図の脇に記入した No. は組合番号であ り、上或は下の記号は斑磨耗の発生した側の別を記した ものである。 第7図(A,B) ヘルツ応力—繰返数曲線 Fig. 7. (A,B) Hertz Pressure σ—Repeated Number Diagram

これらの結果をみると高周波焼入に依つて斑磨耗耐久 限(σ_{-g}) は著しく高められることがわかる。例えば低 Mn 鋳鋼(上試片): Ni-Cr 鋼(下試片)の異種材料の組合 せに於て高周波焼入すると $\sigma_{-g}=60 \text{ kgmm}^2$ であつた のが 100 kg/mm² に上つた。また同種材料の低 Mn 鋳 鋼では $\sigma_{-g}=35 \text{ kg/mm}^2$ が 70 kg/mm² に上昇し高周 波焼入の効果は極めて顕著である。

〔VII〕 斑 磨 耗 に 就 い て

西原博士の説によれば斑磨耗は繰返接触応力による疲 労によつて発生し、とくに接触点の移動方向と滑りの方 向とが相反するときに発生し易いことになる。斑磨耗が 材料の疲労によつて発生するものであれば2箇の円璹狀 試験片が或る荷重下で接触するときの表面から内部への 応力分布が関係する筈でちる。その半径方向の応力分布

立

評

論

日





- 第9図 応力と斑磨耗の深さ並びに各破損の説に よる最大応力値との関係
- Fig. 9. Relation of Stress and Pitting Depth and Maximum Stress by Theory of Damage

乱もみられるが、それは組織が顕微鏡的に Homogeneous でないこと、非金属介在物による影響などによるの ではないかと考える。

しかし高周波焼入せる試験片の σ=130 kg/mm² に於 ける孔の深さは 1/100 mm 内外であつて、上記の試験

- 第8図 各破損の定理による深さ方向の応力分布
- Fig. 8. Stress Distribution in Radius Axis by Theory of Damage

は下記せる L. Föppl 氏の計算式⁽⁶⁾によつて S=0 に於 ける値が算出できる。

$$\sigma y = \frac{2\sigma_{max}}{a} Z - \frac{\sigma_{max}}{a} \cdot \frac{a^2 + 2Z^2}{\sqrt{a^2 + Z^2}} \dots (3)$$

$$\sigma z = -\sigma_{max} \cdot \frac{a}{\sqrt{a^2 + z^2}} \quad \dots \quad (4)$$

但し ox は平面変形を考える。 a=b/2, b: 接触面の幅 x. 軸: 軸方向、y: 円周方向、z: 半径方向、m: ポアソ ン数

かくして求められた Z 軸に沿う ox, oy, oz の値を更 に各破損の定理に当嵌めて図示すれば第8図の如き線図 を得る。この線図のうち剪断応力説、剪断歪エネルギー 説、主歪説はZ軸方向に最大応力値をもつが、その最大 値の深さと Hertz 応力との関係は第9図に示す如き直 線で表わされる。

次に高周波焼入した試験片を除外して斑磨耗の孔の深 さを触針式の仕上面検査機で測定して第9図にプロット した。この図をみるとプロットした孔の深さは剪断応力 最大値と大体一致していることがわかる。しかし点の散

片とは同一傾向になく上述の試験片より極めて浅かつ た。

[VIII] 硬度・応力・磨耗率の関係線図

以上の実験により得られた斑磨耗発生直前までの磨耗 量をその繰返数で除して磨耗率なる名称で表わすことゝ して、X軸に硬度、Y軸に磨耗率、Z軸にHertz応力を とつた直角座標の立体図でこれらの関係を図示してみ る。

先ず上試験片は低 Mn 鋳鋼 H, F, Q (硬度 Rc 45)の 1種類として、下試験片に Ni-Cr 鋼 H, F, Q (Rc 50), 低 Mn 鋳鋼 H, F, Q, Ni-Cr 鋼 Q, T (Rc 27) の 3 種を 選び、 $S_1=31\%$, $S_2=44\%$ のときの関係図は第10図に示 す如くである。これと同じ材質の組合せで S1≒S2≒0% の条件の結果は第11図の如くなる。また上試験片に低 Mn 鋳鋼 A (Rc 2) を選び、下試験片を上記と同様に組 合せて $S_1=31\%$, $S_2=44\%$ を与えた結果は第12図の如き 関係となる。

A. 応力と磨耗率に就いて

これらの図をみると何れの組合せに於てものが高くな るに従い上下両試験片共に磨耗率は等比級数的に増加し σの影響は大きいことがわかる。

こムでX軸に普通目盛でのをとり、Y軸に対数目盛で **磨耗率をとつて、上記の各々の組合せ磨耗の試験値をプ ロットすれば大体直線関係で表わされる。従つて磨耗率**



- 第10図 上試験片低 Mn 鋳鋼高周波燒入に対する 各種下試験片の組合せに於ける硬度、応 力、磨耗率との関係線図
- Fig. 10. Relation Diagram of Hardness—Hertz Pressure—Specific Abrasion for Various Combination



875

第12図 上試験片低 Mn 鋳鋼燒鈍に対する各種 下試験片の組合せに於ける硬度、応力、



- 第11図 上試験片低 Mn 鋳鋼高周波燒入に対する 各種下試験片の組合せに於ける硬度、応 力、磨耗率との関係線図
- Fig. 11. Relation Diagram of Hardness—Hertz Pressure—Specific Abrasion for Various Combination

磨耗率との関係線図

Fig. 12. Relation Diagram of Hardness—Herty Pressure—Specific Abrasion for Various Combination

をyとすれば本実験の範囲内では

こゝで B, A は試験片の性質と試験条件により決まる 定数であるが、この定数を各試験片に就き求めて σ と y との関係実験式を示せば次の如くなる。

No. 1 組合せ上試片(低 Mn 鋳鋼 A) $S_1=31\%$ $y_{u1}=5.8\times1.101^{\sigma}\times10^{-9}$ mg/N.....(7) No. 1 組合せ下試片(Ni-Cr 鋼 Q,T) $S_2=44\%$ $y_{l1}=1.22\times1.103^{\sigma}\times10^{-9}$ mg/N(8) No. 2 組合せ上試片(低 Mn 鋳鋼 H,F,Q) $S_1=31\%$ $y_{u2}=0.3\times1.101^{\sigma}\times10^{-9}$ mg/N.....(9) No. 2 組合せ下試片(Ni-Cr 鋼 H,F,Q) $S_2=44\%$ $y_{l2}=0.13\times1.099^{\sigma}\times10^{-9}$ mg/N.....(10) No. 4 組合せ上試片(低 Mn 鋳鋼 A) $S_1=31\%$ $y_{u4}=62\times1.10^{\sigma}\times10^{-9}$ mg/N.....(11) No. 4 組合せ下試片(鍛鋼 A) $S_2=44\%$ $y_{l4}=100\times1.094^{\sigma}\times10^{-9}$ mg/N.....(12) No. 6 組合せ上試片(低 Mn 鋳鋼 H,F,Q) $S_1=31\%$ $y_{u6}=0.9\times1.10001^{\sigma}\times10^{-9}$ mg/N.....(13)

876	昭和28年5月	日	77.	評	論	第35 朱 第5 号

No.6 組合せ下試片(低 Mn 鋳鋼 H,F,Q) S2=44% No.7 組合セ上試片(低 Mn 鋳鋼 H,F,Q) S1=31% $y_{u_7} = 8.0 \times 1.099^{\sigma} \times 10^{-9} \quad mg/N.....$ (15) No. 12 組合せ上試片 (低 Mn 鋳鋼 H,F,Q) S1≒0% $y_{u12} = 0.064 \times 1.1029^{\sigma} \times 10^{-9} mg/N....$ (16) No. 12 組合せ下試片 (Ni-Cr 鋼 H,F,Q) S2 = 0% $y_{l_{12}} = 0.1 \times 1.1029^{\sigma} \times 10^{-9} mg/N....$ (17)

B. 磨耗率に及ぼす表面硬度の影響

実験の結果より磨耗率に及ぼす表面硬度の影響を調べ てみる。いま組合せ No. 1 (上試片 A, 下試片 Q,T) と No. 2 (上試片、下試片共 H,F,Q) とに於ける定数 Bの 値を比較すれば(Aの値は一定と仮定する)

No. 1 上試片 B = 5.8 No. 2 上試片 B = 0.3No. 1 下試片 B=1.22 No. 2 下試片 B=0.13 であつて高周波焼入せる方の定数Bの値は一桁下つてい て磨耗し難いことが判る。

また上試片の硬度が高い場合にそれ自身のBの値が下 試片の硬度によつてどの程度に変化するかをみる。今 No.2 と No.7 組合せとは上試片(低 Mn 鋳鋼 H,F,Q) は同一であるが下試片は Ni-Cr 鋼の H,F,Q と Q,T と の差異がある。この場合の上試片のBの値は

目的でその影響を調べてみる。

いま同一材質の組合せである No. 2 (S1=31%, S2= 44%) と No. 12 ($S_1 \Rightarrow S_2 \Rightarrow 0$ %) とを比較すれば No. 2 上試片 B=0.3 No. 12 上試片 B=0.064 No. 2 下試片 B=0.13 No. 12 下試片 B=0.10 となり、S=0の方が上下両試片共にBの値に小さく磨 耗し難いことが判る。

これらの結果を綜合すれば結論として滑りを伴う転り 摩擦では両試片共に硬いときは磨耗し難い。硬度差の大 きい材料の組合磨耗では軟材の磨耗は極めて多く、しか も相手の硬い材料も相当に磨耗する。従つて歯車の場合 にギャーの表面硬度を上げ得ないとき、ピニオンの硬度 を極端に上げるとギャーの磨耗は甚だしくなると共にピ ニオンも磨耗し易いと考えられるから警戒を要する。こ のようなときには寧ろピニオンの硬度はギャーの硬度近 くまで下げた方がよいと思われるが、この点については 更に検討する予定である。

〔IX〕残留応力に就いて

鋼を高周波焼入すれば表面に圧縮の残留応力を生ずる と云われているが、この内部応力は疲労或は磨耗に影響 すると考えられるので、一部の試験片に就いて G. Sachs 法により残留応力の測定を行つた。しかし試験片の長さ が短いので軸方向の値は求められない。

No. 2 上試片 B=0.3 No. 7 上試片 B=8.0 であつて、前者の組合せの方が一桁下つていて磨耗し難 いことを示している。

C. 磨耗率に及ぼす滑りの影響

磨耗に及ぼす滑りの影響を論ずるには実験値が不足で あつて決定的な結論は下し得ないが、大体の目安を得る

第13図に示す如く切線方向の残留応力は表面では圧縮 であるが、内部に入るに従いその値を減じて或る深さよ り引張応力に移つている。試験片は焼戻してあるので圧 縮残留応力値は低く磨耗試験前の Ni-Cr 鋼では 22 kg/



歯車材の磨耗に及ぼす高周波焼入の効果

mm², 低 Mn 鋳鋼では 15 kg/mm² の値を得た。なお低 Mn 鋳鋼に就いて磨耗試験後に測定した結果は 10 kg/ mm² であつたので、磨耗試験中に残留応力は弛緩する ものと思われる。

西原博士、遠藤氏⁽⁷⁾の研究によれば、圧縮残留応力は σ-gを低下させることがわかるが、筆者等の実験では検 討するに足るほど実験値が求められなかつたので追究す ることは避けた。

〔X〕焼入深さの選定に就いて

以上の実体結果によれば斑磨耗の発生を抑えるには表 面硬度を適当に高めると共に硬化深度を剪断応力最大値 を示す深さ以上に達せしめる必要がある。

今前記の歯車に於てギヤーのピッチ線上の曲率半径 r_1 と、ピニオンの r_2 を求め、単位長当りの荷重 P=54.3kg/mm (駆動機関最大回転力 50 kg-m の場合)のとき の Hertz 応力 σ_{max} を求めると $\sigma_{max} \Rightarrow 91.4$ kg/mm² の 値を得る。次に Föpplの算式によつて Z 軸方向に沿つて 応力分布を算出する。一例として Z=0.5 mm に於ける σ_y, σ_z の値を求めると $\sigma_y \Rightarrow -5$ kg/mm², $\sigma_z \Rightarrow -53$ kg/ mm² を得る。最大剪断応力説に従つて $\sigma_y - \sigma_z/2$ に代



入すると 24 kg/mm² を得る。同様にして任意の深さに 於ける $\sigma_y - \sigma_z/2$ を算出して図示すれば第14図の実線の 曲線が求められる。

この図でわかる如く $\sigma_y - \sigma_z/2$ の最大値を示す深さは 表面より約 2.7/10 mm 位の処にある。なお同図に於け る破線の曲線は同値の σ_{max} に就いて試験片の $\sigma_y - \sigma_z/2$ の分布を画いたものであつて、9/100 mm 附近に最大値 がある。

従つて表面焼入深度が浅いと表面の強度が高くとも、 内部に於て外力による応力が材料の許容応力を超過し て、斑磨耗を誘発することが考えられる。また精度を良 くするために歯を研磨したり、稼動中の機械摩擦で磨耗 したときでも耐磨耗性を損することなきようにすること も考えねばならない。

これらを考慮するとき前記の歯車では歯面に少くとも 2~3 mm の硬化深度をもたせた方がよいと考える。

〔XI〕 斑磨耗耐久限及び磨耗率に及ぼす

高周波焼入の效果

以上の如く高周波焼入した鋼の磨耗に就いて実験して 考察を加えたが、終りに実用に供されている代表的な2 組の組合せに就いて高周波焼入の効果を耐久限及び磨耗 率に就いて比較した。

即ち第3表に掲げる如く σ-g は高周波焼入によつて 170~200%に上昇させることができた。従つてそれだけ



- 第15図 応力と磨耗率に関する高周波焼入の効果
- Fig. 15. Effects by Induction Hardening on σ and Abrasion
- Table 3. Comparison of σ_{-g} between Induction-Hardened Materials and Annealed Material

	焼鈍ご	又は調質	高周波焼入		
組合せ	組合せ No.	$\sigma_{-g} \ { m kg/mm^2}$	組合せ No.	$\sigma_{-g} \ \mathrm{kg/mm^2}$	
低 Mn 鋳鋼(上試片) 低 Mn 鋳鋼(下試片)	8	35	6	70	
低 Mn 鋳鋼(上試片) Ni-Cr 鋼 (下試片)	1	60	2	100	

日 立 評

論

第35卷第5号



許容圧力を高めて設計し得る。同一組合せに於ける磨耗 率は第15図、第16図に示す如くであつて、第15図では焼 鈍材と比較し得ない程に磨耗は少い。第16図では σ=95 ~110 kg/mm² の範囲で実験値が直接比較できるが、磨 耗率で高周波焼入の効果を表わせば約 10 倍以上にある とみられる。 的に低い値であり、磨耗試験により応力弛緩することが 認められた。

(D) 試験片の磨耗する割合を斑磨耗直前までの磨耗 量をその繰返数で除し磨耗率なる名称で表現した。しか して硬度、応力、磨耗率の関係を直角座標の主体図で表 した。

(E) 応力と磨耗率との関係は応力 $\sigma kg/mm^2$, 磨耗 率 $y \ge mg/N$, B 及び $A \ge kg$ 変 成 Mg/N, B 及び $A \ge kg$ 変 成 Mg/N, B 及び $A \ge kg$ 変 成 Mg/N, B 及び $A \ge kg$ 変 Mg/N, B 及び $A \ge kg$ Mg/N, B Mg/N, Mg

(F) *蘑*耗率に及ぼす滑り率の影響は大であり、滑を 有した場合の方が定数*B*の値は大きい。

(G) 表面硬度差が大きい組合せでは軟材の磨耗は極めて多く、しかも相手の硬材も相当に磨耗する。硬度差が接近していれば磨耗は少いが、矢張り硬材同種の方が更に少い。

(H) 従つて歯車の場合、磨耗を少くすることのみか ら考えれば、ピニオンのみ硬度を上げることは好しくな く、ギャーも共に硬くすべきである。もしギャーの硬度 を上げ得ないときはピニオンの硬度はギャーの硬度近く

しかし以上は試験片による比較であつて、実物では種 々なる条件が入るので、その効果に就いては実物に就き 長期間にわたり調査せねばならないが、既に得られた資 料によれば顕著であることが確められている。

〔XII〕 結 言

前述の如く高周波焼入歯車の設計資料を得る目的で転 り磨耗の実験を行い、斑磨耗耐久限並びに磨耗量を求め た。供試の材質は歯車用として使用されている代表的な 3種類を選び、高周波焼入或は普通の熱処理を施して試 験片とした。磨耗試験の条件は或る歯車の噛合条件によ つて決定したが、実験並びに考察の結果を要約すれば次 の如くである。

(A) 何れの材質に於ても高周波焼入すれば斑磨耗耐 久限は著しく高くなるから許容接触応力を相当に高くと ることができる。本実験の結果では高周波焼入せるもの は調質材の170%, 焼鈍材の200%のσ-gに相当した。

(B) 高周波焼入せるものを除き斑磨耗を生じた試験 片の孔の深さは剪断応力最大値を示す深さと大体一致し た。しかし高周波焼入せるものは前者と傾向を異にして 極めて浅い。

(C) 二三の試験片に就き残留応力を測定したが比較

まで下げた方が無難であると思われる。

(I) 歯の焼入深さが浅過ぎると表面硬度は高くとも 斑磨耗を発生する懼れがある。適当な硬化深度は歯の大 きさによつて変るが、前記の歯車では少くとも2mm位 に選ぶ必要があろう。

(J) 実験の結果から高周波焼入の効果をみると、斑 磨耗耐久限では鋼質材の 170%, 焼鈍材の 250% に相当 し、磨耗率は約 1/10 に減少しその効果は顕著である。

終りに臨み本研究に研究助成金を交附された建設省土 木研究所、種々御便宜を与えられた建設機械化協会、御 指導を賜つた九州大学教授石橋正先生、建設技官中岡二 郎氏に深甚なる謝意を表する。社内では研究課小堀課長、 輸設課安河内課長より懇篤な御指導を賜り、輸設課安井 課員、歯切係森田主任、熱処理係浜野主任、黒木課員、 輸設課柿沼課員より御意見或は御援助を受けたので厚く 御礼申上げる次第である。

参考文献

(1)	寺前、牧野:	日立評論 32 (1950) 12 P. 1
(2)	牧野、黒木:	日 立 13 (1951) 1~2 P. 25
(3)	寺前、牧野:	金属 20 (1950) 6 P. 44
(4)	西原、小林:	機械学会論文集 3 (1937) 13 P. 292
(5)	西原、福原:	機械学会論文集 7 (1941) 29 P. 61
(6)	西原、遠藤:	機械学会論文集 14(1948) 46 P. 103
(7)	西原、遠藤:	機械学会論文集 15(1949) 50 P. 1
(8)	石田 :	日立評論 26 (1943) 6 P. 34
(9)	石田 :	日立評論 26 (1943) 12 P. 24