鉄系焼結合金の疲労強度に及ぼすショットピーニング， 表面ロールおよび高周波焼入れの影響*

岸 本 秀 弘** 小 倉 興 一*** 栗 津 重 男***

The Effect of Shot-Peening, Surface Rolling and Induction Hardening, on the Fatigue Strength of Sintered Ferrous Alloy

by

Hidehiro KISHIMOTO, Kouichi OGURA and Shigeo AWAZU

(Toyota Motor Co., Ltd., Toyota)

The effect of shot-peening, surface rolling and induction hardening on the rotary bending fatigue strength of sintered ferrous alloy was investigated. The main results obtained are as follows :

(1) The fatigue limit of plain specimens is raised by shot-peening, but the increment of the fatigue limit is small due to the notch effect of the pores flattened by the shot-peening. The notch effect of flattened pores increases as the original density decreases. The fatigue limit of specimens resintered after shot-peened is higher than that of specimens processed only by shot-peening, because the flattened pores disappeared during the resintering after shot-peening.

(2) The fatigue limit of notched specimens is considerably raised by surface rolling.

(3) The fatigue limit is raised by induction hardening. The rate of increase of fatigue limit is larger in the case of notched specimens than plain specimens. The analysis of induction hardened plain specimens shows that the change of microstructure of the specimen caused by the induction hardening contributes little to the increase of the fatigue limit due to the reasoning that, as is easily predicted, the notch effect of the pores is more serious in the case of martensitic structure.

(Received May 25, 1971)

1 緒 言

近年における粉末冶金技術の進歩は著しく，原料粉末製造技術の発展とあいまって経済的量産体制が確立された．形状的に複雑な機械部品の多量生産に際しては，材料歩留りの向上および加工費の低減が果せるので，従来採用されていた鍛造後機械切削の代わりに，これを粉末冶金法で製造するといった場合が年を追って増加している現状である．

粉末冶金製品の疲労強度に関する研究は比較的古くから開始されている．その疲労強度は内部に存在する空孔の切欠き作用のために基地の疲労強度に比較して劣る．この点が粉末冶金製品の難点で，これを解決するために合金元素による基地の強化，熱処理による強化，その他の方法がとられて実用化が推進されている．著者らは，以前に鉄系焼結合金の静的強度特性および疲労強度特性について研究し報告したが^{3)~5)}，今回前報告と全く同じ材料について疲労強度を向上させる方法と

してのショットピーニング，表面ロールおよび高周波焼入れの効果を調べた．またその結果を空孔による切欠き効果との関連で若干考察したので報告する．

2 供試材料および試験片形状

試験に供した材料は炭素と銅を合金元素とする鉄系焼結合金である．その化学成分を Table I に示す．機械的性質を Table II に示す．顕微鏡組織の一例を Fig. 1 に示す．製造方法は別報告で詳述したので省略する．疲労試験片の形状寸法を Fig. 2 に示す．これら

Table I. Chemical compositions of materials (%).

Name of materials	C	Si	Mn	P	S	Cu
No 1	0 08	0 17	0 03	0 008	0 016	7 09
No 2	0 19	0 18	0 04	0 008	0 018	7.21
No 4	0 14	0 19	0 04	0 008	0 012	7 46
No 5	0 65	0 14	0 03	0 008	0 009	7 04
No 6	0 57	0 11	0 04	0 009	0 009	6 99
No 8	0 60	0 13	0 04	0 008	0 005	7 04
No 9	0 46	0 02	0 23	0 008	0 006	7 14
No 21	0 55	0 10	0 25	0 009	0 006	5 81

* 原稿受理 昭和46年5月25日

** 正 会 員 トヨタ自動車工業(株) 豊田市トヨタ町

*** トヨタ自動車工業(株) 豊田市トヨタ町

Table II. Mechanical properties of materials.

Name of materials	Density γ (g/cm ³)	Proof stress $\sigma_{0.2}$ (kg/mm ²)	Tensile strength σ_B (kg/mm ²)	Elongation φ (%)	Reduction of area ψ (%)	Charpy impact value (kg-m/cm ²)	Hardness H_B (2.5/62.5/30)
No. 1	6.21	19.7	22.0	0.87	0.9	0.26	64
No. 2	6.54	—	25.9	—	—	0.25	84
No. 4	6.91	29.8	35.7	2.26	3.2	0.31	101
No. 5	5.94	31.8	32.7	0.43	0.2	0.12	90
No. 6	6.41	39.5	42.2	0.39	0.2	0.22	92
No. 8	6.68	43.6	48.9	0.59	1.2	0.21	124
No. 9	6.87	41.7	49.6	1.48	1.9	0.38	142
No. 21	6.90	41.4	49.0	1.25	2.5	0.20	128

Fig. 1. Microstructure of materials tested ($\times 400 \times \frac{1}{2}$).

Fig. 2. Fatigue test specimens.

はいずれも $14^4 \times 94$ なる角棒状に圧縮後焼結された素材から機械切削にて製作された。

3 表面処理

試験項目を Table III に示す。材料名 No. 1~8 の試験は密度の異なった材料に対するこれら表面処理の効果を調べるために、材料名 No. 9 の試験はショットピーニングパス回数の影響とショットピーニング後焼結処理の効果を調べるために、そして材料名 No. 21 の試験は表面ロール荷重と疲労強度の関係を調べるために実施した。

Table III. Arrangement of tests.

Name of materials	Plain specimen	U-notched specimen	V-notched specimen
No. 1	Shot peened	Surface rolled	Surface rolled
No. 2	"	"	"
No. 4	"	"	"
No. 5	Induction hardened	Induction hardened	Induction hardened
No. 6	"	"	"
No. 8	"	"	"
No. 9	Shot peened	—	—
No. 21	—	—	Surface rolled

ショットピーニングは遠心式装置によって平均直径約 0.6 mm カットワイヤショットを 70 秒間打ちあてた。これをパス回数 1 回のもと呼ぶ。ショットピーニング後の焼結処理ではカーボンポテンシャル 0.8 % なる RX ガスとブタンエンリッチガスの混合気中で 1150°C に約 50 分保持して後徐冷した。ショットピーニングのままのもの、およびショットピーニング後焼結したものものの表面部顕微鏡写真を Fig. 3 に示す。Fig. 3 (a) では空孔が叩きつぶされて面状になっている。Fig. 3 (b) では面状になった空孔が消失して、わずかに微少な空孔を残すのみである。

表面ロールについては半円切欠き試験片に対して直径 40 mm、先端曲率半径 0.9 mm のローラーを用いた。V 溝切欠き試験片に対しては直径 40 mm、頂角 55° 、先端曲率半径 0.2 mm のローラーを用いた。ロール回数はすべて 30 回とした。ロール荷重としては疲労強度を最大にする荷重を求め、この荷重で表面ロールを実施した。すなわち半円切欠き試験片に対しては 100 kg、V 溝切欠き試験片に対しては 30 kg である。表面ロールを施こしたものの縦断面の写真を Fig. 4 に示す。切欠き底部では空孔がすべて押しつぶされている。同図で U 溝切欠きにき裂がみえるが、これは 10^7 回応力繰返し後のものである。表面ロールのままのものではこのようなき裂はない。

Fig. 3. Micrographs of a shot peened surface and a surface that was resintered after shot peening (Lengthwise cross-section, $\times 500 \times \frac{1}{4}$).

Fig. 4. Micrographs of surface rolled notch root (Lengthwise cross-section, $\times 25 \times \frac{2}{5}$).

高周波焼入れは内径 18 mm, 外径 48 mm および厚さ 3 mm の銅製コイルによる移動焼入法により実施した。高周波焼入れ後の表面部顕微鏡組織を Fig. 5 に示す。表面部ではほぼ 100 % マルテンサイトになっている。

Fig. 5. Microstructure of induction hardened plain specimens ($\times 400 \times \frac{1}{2}$).

4 疲 労 試 験

疲労試験には高速回転曲げ疲労試験機を用いた。試験速度は約 4000 rpm である。

5 試験結果および考察

5.1 ショットピーニング

S-N 線図の例を材料名 No. 2 について Fig. 6 に示す。疲労試験結果の内、ショットピーニングパス回数とショットピーニング後の焼結の影響については Table IV に、密度が変化した場合のショットピーニングの影響については Table V の左欄に示す。

まずパス回数の影響については、パス回数 2 回で耐久限度は最大になり、パス回数 4 回になると無処理のものと同じ値にまで低下した。耐久限度が最大になる時のアークハイトは 0.0155"-A で鋼の例に比較的近

Fig. 6. S-N diagram of No. 2 (Shot peened or surface rolled).

Table IV. Fatigue test results (No. 9).

Treatments	Arc height (in)	Fatigue limit (kg/mm ²)	Ratio
M.	—	21.9	1
M. + S. P. ($\frac{1}{2}$)	0.0125	22.3	1.02
M. + S. P. (1)	0.0150	23.1	1.05
M. + S. P. (2)	0.0155	24.3	1.11
M. + S. P. (3)	0.0145	23.5	1.07
M. + S. P. (4)	0.0165	≈ 22	≈ 1.0
M. + S.	—	21.9	1.00
M. + S. P. (1) + S.	0.0150	27.5	1.26

M.; Polished after machined

Numbers in parentheses show the numbers of pass

S.; Resintered

6)
い。

しかし No. 1~4 の結果も含めていずれも表面から破壊し十分に耐久限度が増加したとはいえない。Fig. 3 (a)より明らかなごとく、ショットピーニングによって表面部密度は上昇し加工硬度を起こしている。さらに表面部では鋼の例より類推して圧縮残留応力も発生していると思われるが、それにもかかわらず表面層から破壊したのは Fig. 3 (a)にみられる面状空孔の切欠き作用にある。Fig. 7 にこれら面状空孔から出発したと考えられる多数の疲労き裂を示す。

ショットピーニング後に焼結処理を施すと Fig. 3 (b)に示したごとくこれら面状空孔は消失するので表面

Table V. Fatigue test results (Shot peening and surface rolling).

Name of materials	Plain specimen			U-notched specimen				V-notched specimen			
	Fatigue limit (kg/mm ²)		Increasing rate in fatigue limit (%)	Fatigue limit (kg/mm ²)			Increasing rate in fatigue limit (%)	Fatigue limit (kg/mm ²)			Increasing rate in fatigue limit (%)
	Without treatment	Shot peened		Without treatment	Fatigue notch factor	Surface rolled		Without treatment	Fatigue notch factor	Surface rolled	
No. 1	10.1	12.3	+22	7.5 (1.35)		15.6	+108	6.5 (1.55)		10.8	+66
No. 2	13.1	15.5	+19	9.4 (1.39)		20.1	+114	8.5 (1.54)		16.2	+91
No. 4	17.5	20.3	+16	11.9 (1.47)		25.4	+114	11.0 (1.59)		20.3	+85

Fig. 7. Fatigue cracks originating from shot peened and crushed pores (Lengthwise cross-section, $\times 500 \times 3/5$).

部密度に見合った強度が期待される。疲労試験の結果では、表面部の加工硬化と圧縮残留応力は完全に消失しているにもかかわらず、耐久限度は著しく上昇し 27.5 kg/mm^2 になった。耐久限度時の曲げモーメントの下でひずみ分布の連続性を仮定し、表面下 0.2 mm までが密度 100% でそれより内部は元の密度のままであると仮定すると表面部の真の応力は下式により 35.2 kg/mm^2 になる。

表面部の真の応力

$$= \text{耐久限度} / \{1 - (d_1/d_0)^4 (1 - E/E_0)\}$$

ただし

d_0 : 試験片の直径 $= 8 \text{ mm}$

d_1 : 密度上昇のない部分の最外径 $= 7.6 \text{ mm}$

E_0 : 100% 密度時のヤング率の推定値⁵⁾
 $= 19740 \text{ kg/mm}^2$

E : No. 9 のヤング率⁵⁾ $= 14240 \text{ kg/mm}^2$

ショットピーニングの打痕による凹凸の切欠き作用を考慮するために、それによる切欠き係数を 1.2 と仮定すると、表面層材質の耐久限度は約 42 kg/mm^2 と推定され、材料名 No. 9 の基地の耐久限度としてはほぼ妥当な値と考えられる。これよりショットピーニング後の焼結処理によって面状空孔は完全に消失し冶金学的に健全な組織になっていることがわかる。

次に材料の密度の違いによるショットピーニングの効果の違いを検討する。簡単のために表面下 0.2 mm までは密度 100% でそれより内部は元の密度のままであると仮定し、密度の増加した部分のヤング率が完全な組織のものと同じであると仮定すると、耐久限度荷重下での表面層の真の応力は No. 1 で 21.0 kg/mm^2 、

No. 2 で 22.8 kg/mm^2 、No. 4 で 26.5 kg/mm^2 となる。これはショットピーニング条件下での表面層材質の耐久限度と考えられる。元の密度の小なるもの程度面層材質の耐久限度が小さい。これは低密度の材料程空孔の量は多く、個々の空孔も大きいので叩きつぶされて面状になった空孔の切欠き効果が大いことを示すと考えられる。

5.2 表面ロール

S-N 線図の例を材料名 No. 2 について Fig. 6 に示す疲労試験結果をまとめて Table V の右欄に示す。

表面ロールによる耐久限度増加は著しい。耐久限度増加の程度は V 溝切欠き材よりも半円切欠き材の方が著しい。

表面ロールによる耐久限度増加について検討するために耐久限度で 10^7 回以上の応力繰返しの後、破壊しなかった試験片の切欠き底を調査した。切欠き底に見出された疲労き裂の平均深さは、表面ロールしなかった試験片では半円切欠き材および V 溝切欠き材とも 0.010 mm であったが、表面ロールした試験片では半円切欠き材で 0.186 mm 、V 溝切欠き材で 0.131 mm で非常に深い。表面ロールしたものの耐久限度は、表面ロールしないものの耐久限度の 1.16 倍 ~ 2.14 倍である。切欠き底の挙動が弾性的と仮定すると切欠き底では平滑材耐久限度の 3.7 倍 ~ 4.9 倍の応力振幅となっている。したがって表面ロールを施した試験片では疲労試験の非常に早い時期に疲労き裂が発生すると考えられる。かりにき裂進展速度が試験中一定であるとすると、半円切欠き材では $1.86 \times 10^{-8} \text{ mm/回}$ 、V 溝切欠き材では $1.31 \times 10^{-8} \text{ mm/回}$ となり、き裂伝ば速度としてはきわめて遅くこのように遅いき裂伝ば速度は下限値(Threshold)⁸⁾ に対するものと考えられるので、これらの疲労き裂が停留き裂である可能性が高い。すなわち表面ロールにより耐久限度が十分に増加するためには上記程度の長さの停留き裂の発生を受け入れることが必要である。このためには切欠き底において表面から $0.2 \text{ mm} \sim 0.3 \text{ mm}$ 近辺までの材料特性ないしは残留応力が鍵になると考えられる。しかしショット

Table VI. Fatigue test results (Induction hardening).

Name of materials	Plain specimen			U-notched specimen			V-notched specimen		
	Fatigue limit (kg/mm ²)		Increasing rate in fatigue limit (%)	Fatigue limit (kg/mm ²)		Increasing rate in fatigue limit (%)	Fatigue limit (kg/mm ²)		Increasing rate in fatigue limit (%)
	Without treatment	Induction hardened		Without treatment	(Fatigue notch factor)		Without treatment	(Fatigue notch factor)	
No. 5	12.4	16.7	+35	9.4 (1.32)		+65	8.4 (1.48)		+70
No. 6	15.0	23.5	+57	11.4 (1.31)		+71	10.3 (1.45)		+97
No. 8	17.7	26.3	+47	13.4 (1.32)		+55	11.8 (1.50)		+75

Fig. 8. Relation between surface rolling load and estimated fatigue limit, surface hardness, depth of work hardening and increment in groove width (No. 21, V-grooved notch).

ピーニングにおける検討より材料特性の変化（密度上昇と加工硬化）による効果は余り期待できないということ、切欠き底に発生した 0.186 mm (U 溝切欠き) ~ 0.131 mm (V 溝切欠き) におよぶ裂のそれ以後の進展を考えると圧縮残留応力の効果が最も重要であると推論される。

材料名 No. 21 の V 溝切欠き材に関する表面ロール荷重と試験片寸法の変化、切欠き底部硬度、加工硬化深さ、および耐久限度（推定値）の関係を Fig. 8 に示す。耐久限度を求めるにあたってはこの場合のみは簡単のために、各表面ロール荷重に対して一本の試験片について疲労試験を実施し、表面ロールを施こした試験片の S-N 曲線が無処理のもの S-N 曲線を応力軸方向に平行移動させたものと仮定して、有限寿命の試験結果から耐久限度を推定して求めた。なお加工硬化深さとしては、表面ロールされた試験片の縦断面上でヌープかたさ分布を求め、内部かたさよりもヌープかたさ値で 20 大きい場所までの表面からの距離をとった。切欠き底材質の硬度は最小の表面ロール荷重ですでにほぼ最高値に達し、表面ロール荷重が増加しても不変である。加工硬化深さは表面ロール荷重とともに増加しつづける。耐久限度は表面ロール荷重約 30 kg 迄は表面ロール荷重とともに増加するが、それ

以上になると飽和する。一方溝幅は表面ロール荷重 30 kg くらいから増加しはじめる。以上より表面ロール荷重 30 kg 以下では表面ロール荷重の増加に伴う加工硬化層深さの増加と、加工硬化層内部に発生しているとみられる圧縮残留応力とがあいまって、耐久限度の増加に寄与していると思われる。しかし表面ロール荷重 30 kg 以上では耐久限度は飽和するのがみられる。これより加工硬化層深さの増加の寄与を相殺する効果が顕著になってきたと推測される。この要因として考えられる過加工による表面層の弱化については、全試験片の縦断面での観察でき裂等の異状は発見できなかったため、切欠き底の圧縮残留応力減少の可能性が強い。溝幅変化がその現われではないかと推測される。

5.3 高周波焼入れ

S-N 曲線の例を材料名 No. 6 の場合について Fig. 9 に示す。疲労試験結果を Table VI に示す。

高周波焼入れを施こすことによって耐久限度はそれぞれ増加した。その増加率は平滑材より切欠き材の方

Fig. 9. S-N diagram of No. 6 (Induction hardening).

がまた切欠き材の中では切欠きの厳しい V 溝切欠き材の方が大きい。この傾向は鋼にも、球状黒鉛鋳鉄にもみられるものである。

鋼についての研究によれば、高周波焼入れによる疲労強度増加の原因は表面層の材質の改善と圧縮残留応力の発生にあるといわれている。当焼結合金についてもこの点を検討するために、表面部の残留応力分布を X 線で測定した。その結果を Fig. 10 に示す。表面で最大の圧縮残留応力を生じ、その値は 10~15 kg/mm² である。これら残留応力は耐久限度近くでの応力繰返

Fig. 10. Distributions of residual stress in induction hardened plain specimens.

Table VII. Estimation of increment in fatigue limit due to hardness increase and due to residual stress (kg/mm²).

Name of materials	Increment in fatigue limit due to hardness increase	Increment in fatigue limit due to residual stress
No 5	0.5	3.8
No 6	3.3	5.2
No 8	2.5	6.1

しによってほとんど変化していないようである。そこで表面における残留応力が平均応力として作用すると仮定し、高周波焼入れ材質の耐久限度線図が高周波焼入れされていないものの修正 Goodman 線図に平行であると仮定する。そうすれば耐久限度増加量を残留応力に起因するものと、材質改善に起因するものとに分離することができる。この結果を Table VII に示す。表面部材質はマルテンサイトに变化したにもかかわらず、この変化に基づく耐久限度増加は少ない。これは焼結合金に存在する空孔の切欠き作用がかたいマルテンサイト組織に対して特に著くなるためであると考えられる。

6 結 語

鉄系焼結合金の疲労強度に及ぼす 3 種類の表面処理の影響について疲労試験を実施し、若干の考察を加えた。これらをまとめると以下のようになる。

(1) ショットピーニングの影響に関しては、耐久限度を最大にするパス回数が存在し、本実験に供した条件ではパス回数 2 回であった。この時のアークハイトは 0.0155"-A であった。

(2) ショットピーニングを施こすと耐久限度は増加するが、すべて表面から破壊し充分とはいえない。こ

の主な原因は叩きつぶされて面状になった空孔の切欠き作用にあると考えられる。このためにショットピーニングを施こすと表面部の密度はほぼ 100 % になっているが、表面部材質は元の密度の小なるもの程弱い。

(3) ショットピーニング後焼結すると、面状空孔が消失して表面部の材質は健全なものとなり、疲労強度は大幅に増加する。

(4) 表面ロールを施こすことによって疲労強度は著く増加する。その程度は V 溝切欠き材の場合よりも半円切欠き材の方が著しい。

(5) 表面ロールによる耐久限度の増加には切欠き底表面から若干内部までいたる部分の材質と残留応力が重要である。特に後者の役割が大きいと推察される。

(6) 高周波焼入れを施こすことによって疲労強度は著く増加する。その程度は平滑材よりも切欠き材の方が大きく、切欠き材の内では切欠きの鋭い V 溝切欠き材の方が著しい。

(7) 高周波焼入れを施こした平滑試験片についてみれば、表面部がマルテンサイトに变化したことによる利得は少ない。これは空孔による内部切欠き効果の増加に起因するものと考えられる。

(昭和46年5月20日 日本材料学会第20期通常総会学術講演会にて講演)

参 考 文 献

- Goetzel, C.G., and R.P. Seeling, Trans. Amer. Soc. Metals, **40**, 747 (1940).
- Hempel, M., and H. Wiemer, Arch. Metallkunde, **3-1**, 11 (1949).
- 森田正俊, 高橋 達, 岸本秀弘, トヨタ技術, **15-2**, 1 (1963).
- 森田正俊, 高橋 達, 岸本秀弘, トヨタ技術, **16-1**, 37 (1964).
- 岸本秀弘, 小倉興一, トヨタ技術, **18-4**, 9 (1967).
- 大野 明, 宮川信男, 材料試験, **6**, 23 (1957).
- 日本材料試験協会疲労部門委員会, 材料試験, **10-96**, (1961).
- Johnson, H.H., and P.C. Paris, J. Engineering Fracture Mechanics, **1-1** (1968).
- 中村 宏, “高周波焼入れと疲労強度” (1963) 日刊工業新聞社
- 高橋 達, 岸本秀弘, 第 9 回材料試験連合講演会前刷 (1965).