研 究

高温焼結した低合金鋼の疲労強度に及ぼす浸炭焼入れ並びにショットピーニングの影響

菅野 光輝^{★1}, 武田 義信^{★1}, ビヨン リンドクヴィスト^{★2}, 植田 義久^{★3}^{★1}ヘガネスジャパン(株), 〒107-0052 港区赤坂4-2-19.^{★2}ヘガネス AB, S-263 83 ヘガネス, スウェーデン.^{★3}(株)ファインシンター, 〒607-8201 京都市山科区栗栖野狐塚5-1.

Influence of Shot-peening and Carburizing on Fatigue Strength of High Temperature Sintered Steel

Koki Kanno^{★1}, Yoshinobu Takeda^{★1}, Björn Lindqvist^{★2} and Yoshihisa Ueda^{★3}^{★1}Höganäs Japan K.K., 4-2-19, Akasaka Minato-ku, Tokyo 107-0052.^{★2}Höganäs AB, S-263 83 Höganäs, Sweden.^{★3}Fine Sinter Co., LTD., 5-1 Kitsunozuka Kurisuno Yamashina-ku, Kyoto 607-8201.

Received May 15, 2003

SYNOPSIS

Partially diffusion bonded alloy has been used for components which require high mechanical properties. Secondary operations as a Carburizing are used for these materials to achieve higher strength. Prealloyed 3Cr-0.5Mo powder can have excellent mechanical properties when it is sintered at 1250°C. Though this material has introduced in the market in 1998, it has not been evaluated completely about Fatigue Strength after Carburizing and Shot Peening Process that are common process to achieve higher fatigue strength in wrought steels. Considerations when applying such secondary operations to these materials in different conditions are given in this paper.

KEY WORDS

Cr-alloyed PM-steels, Fatigue Strength, Mesh Belt Furnace, High Temperature Sintering

1 緒 言

粉末冶金用鉄粉及び鋼粉の80%以上が自動車用部品に使用されている。自動車用構造部品に要求される特性は高性能であり完成品として低コストであることである。従って理想的な構造部品材料としては、①低コスト、②容易に思い通りの形状が得られること、③比強度が高いこと等が挙げられる。

今までは4mass%Ni-1.5mass%Cu-0.5mass%Mo系部分拡散合金鋼粉が高性能部品用材料として使用され続けている。これを補完する材料として3mass%Cr-0.5mass%Moの予合金鋼粉材料が1998年に紹介され¹⁾, その後高温焼結において優れた性質を示す事例が報告されている²⁻⁴⁾。

ところが粉末冶金材料の静的なデータは豊富であるが、疲労等の動的強度のデータが不足しているのが現状である。これが粉末冶金部品の拡大を妨げる1つの要因となっている。2001年に検索したところ数例の報告が認められただけであった⁵⁾。構造部品を設計するにあたり疲労強度は避けて通れない検討事項であり、今後疲労強度データの充実が望まれる。

疲労強度に及ぼす要因として、①密度、②硬度、③金属組織(介在物・欠陥)、④表面粗さ、⑤残留応力等がある。溶製

材においてこれらの研究は大に行われているが、粉末冶金材料については残留応力関係の研究発表が少ないのが現状である。

そこで焼結後の工程において疲労強度に及ぼす要因を調べる事は粉末冶金材料の今後の拡大に大いに役立つ事と考えられる。ここでは疲労強度向上に寄与する浸炭焼入れ工程とショットピーニング工程に着目し、金属組織及び工程の影響について調べ、溶製材との違いについて述べる。

2 実験方法

2.1 材料

粉末材料として従来から使用されている4mass%Ni-1.5mass%Cu-0.5mass%Mo部分拡散合金鋼粉(以下DistaloyAE)及びこれと同等以上の機械的性質を有する3mass%Cr-0.5mass%Mo予合金鋼粉(以下AstaloyCrM)を用いTable 1に示す組成の材料で試験を行った。1250°Cでの焼結後の結合炭素量がAstaloyCrMでは0.4mass%に、DistaloyAEでは0.5mass%になるように黒鉛を添加し、浸炭焼入れ用としてはAstaloyCrMは0.2%の結合炭素量になるよう添加黒鉛量を調整し、DistaloyAE

Table 1 Powder Compositions.

No.	Base Material	Graphite	Lubricant	Note
1	Fe-4%Ni-1.5%Cu-0.5%Mo (DistaloyAE)	0.5%	0.6%	
2	Fe-4%Ni-1.5%Cu-0.5%Mo (DistaloyAE)	Nothing	0.6%	Carburizing
3	Fe-3%Cr-0.5%Mo (AstaloyCrM)	0.5%	0.6%	
4	Fe-3%Cr-0.5%Mo (AstaloyCrM)	0.3%	0.6%	Carburizing

Table 2 Conditions of Shot Peening Process.

CSP		U	SP
Type	Air Nozzle Type	Type	Ultrasonic Type
Shot	RCW06PH	Shot	SUJ2 OD0.6mm
Air pressure	0.3 MPa	Quantity of Shot	3.04 g
Peening time	15 sec	Peening Time	360 sec
Distance to work	150 mm	Distance to work	200 mm
Arc Height	0.32mmA	Amplitude	90 μ
Work Revolutions	12 rpm	Frequency	20 kHz
		Arc Height	0.487mmN
		Work Revolutions	12 rpm

は黒鉛無添加とした。また全ての材料に温間成形用の潤滑剤を0.6mass%添加している。

2.2 成形焼結

各粉末材料を140℃に加熱後800MPaで温間成形し、1250℃×30分分解アンモニアガス(DA)雰囲気中で焼結した。

2.3 浸炭焼入焼戻

焼結体の一部は浸炭焼入焼戻処理を施している、860℃×90分 C.P.=0.8%, 80℃の油焼入、200℃×90分 焼戻

2.4 ショットピーニング

焼結体の一部と浸炭焼入焼戻処理品の一部にショットピーニング処理を行い、その効果について調べた。Table 2に通常ショットピーニング処理(エアノズル式)と超音波ショットピーニング処理(超音波による振動エネルギーでショットが往復運動を繰り返すところに試験片を曝す方法)の条件を示した。

2.5 疲労強度試験

疲労強度試験はFig.1に示す試験片を用い、段階法による平面曲げ疲労試験方法で行った。応力比R=-1に設定し、周波数25Hzの4点曲げ疲労試験であり、50%の破壊確率を200万回までの繰り返し数で求めた。試験機の外観をFig.2に示す。

Fig.1 Shape of Fatigue Strength Bars.

CS344にて計測した。また過剰に酸化していないことの確認にはLecoTC136を用いて酸素濃度を得ている。Table 3に各試料の焼結後の化学分析値を示す。DistaloyAE及びAstaloyCrMの両者共に予測通りの炭素濃度が得られ、また高温焼結により酸素濃度の低減が可能であった。Ni・Cu・Moの部分拡散合金鋼粉の焼結容易性はGibbsの自由エネルギー線図から明確であるが、酸素親和力の強いCrを含むAstaloyCrMにおいても0.01mass%レベルまで酸素量を低減可能であった。これらは次の合金鋼の酸化還元平衡から説明できる。

$$\Delta G^{\circ} = A + BT \log T + CT = -RT \ln K$$
$$2Cr + 2/3 O_2 = Cr_2O_3 \quad K = 1/(a_{Cr}^2 \cdot P_{O_2}^{2/3})$$
$$P_{O_2} = \exp(2\Delta G^{\circ}/(3 \cdot 1.987 \cdot T)) / a_{Cr}^{3/4}$$

3 実験結果および考察

3.1 化学分析

焼結後に狙いの炭素量が得られたことを確認する為にLeco

Fig.2 Equipment of Fatigue Strength Test.

一方 $\Delta G^\circ(\text{cal}) = -267,750 + 62.1 T^\circ$ から各温度での ΔG° が求まる。ここで R は気体定数である。また各合金の Cr の活量がモル分率から求まる。この場合 Cr の活量は 0.0279 であった。故に平衡定数 K が求まり、各温度での PO_2 が求まる。

今回の焼結温度 1250°C における AstaloyCrM の平衡酸素分圧は $3.19 \times 10^{-15} \text{ atm}$ であった。また通常の分解アンモニアガス (DA) 雰囲気中の酸素分圧は $1.31 \times 10^{-17} \text{ atm}$ であるから熱力学的平衡からみて Cr 合金は還元可能である。DistaloyAE は Fe に $\text{Ni} \cdot \text{Cu} \cdot \text{Mo}$ を部分拡散合金接合しており、自由エネルギー線図から判断して勿論容易に還元される。

また含有されている C による Cr_2O_3 の還元反応は

この反応の 1250°C における ΔG° は $\Delta G^\circ(\text{cal}) = 187,650 - 124.95 T^\circ$ から求まる。 Cr の活量を考慮すると CO の平衡分圧は 14.6 atm となり、平衡は右に進み炭素が Cr 酸化物を還元する。これが焼結後に炭素量が減少した理由である。

ここで添加黒鉛量と焼結後の炭素量を比較すると $0.15 \text{ mass\%}$ の損失があり、この損失は上記反応で CO として損失する考えると重量比で $\text{C}:\text{O} = 12:16 = 3:4$ である。従って損失した炭素が全て還元に寄与したと仮定すると還元された酸素量は $0.15 \times 4/3 = 0.20 \text{ mass\%}$ となる。当初含まれていた酸素量が $0.21 \text{ mass\%}$ であるから妥当な値となる。

従って本焼結中に添加黒鉛による Cr_2O_3 の還元反応が生じ、良好な焼結が実現したものと考えられる。

Fig.3 Partial pressures of Oxygen of Cr materials and Nitrogen based Atmospheres.

また 1120°C での焼結よりも高温で還元力が高まることは同様の計算により、高温での AstaloyCrM の平衡酸素分圧と雰囲気中の平衡酸素分圧との差が高温程大きくなることから理解できる。Fig.3 に純水素雰囲気と $90\text{N}_2/10\text{H}_2$ 雰囲気の場合において、本材料と純 Cr の各温度における平衡酸素分圧の計算結果を示す。以上のことは焼結後の酸素分析結果に表われており、高温程、還元されていることが証明された。

3.2 静的機械的性質

焼結及び浸炭焼入焼戻後の静的機械的性質を Table 4 に示す。

冷却速度 $0.5^\circ\text{C}/\text{sec}$ において DistaloyAE + $0.5 \text{ mass\% C}$ の場合、パーライト/ベイナイト組織が 50% 、マルテンサイト組織が 40% 、フェライト組織が 10% である。一方 AstaloyCrM + $0.4 \text{ mass\% C}$ の場合は、ベイナイト組織が 90% 、マルテンサイト組織が 10% となる。

密度一定として各相の硬度から強度を推定し⁷⁾、寄与率を相の比率で各材料の焼結後の引張強度を推定する。結果は以下の通りである。

DistaloyAE (密度 7.48 g/cm^3) の場合：

$$\text{TTS} = (0.5 \times 870 + 0.4 \times 1695 + 0.1 \times 500) \times 0.90 = 1047 \text{ MPa}$$

AstaloyCrM (密度 7.38 g/cm^3) の場合：

$$\text{TS} = (0.9 \times 930 + 0.1 \times 1695) \times 0.85 = 855 \text{ MPa}$$

Table 3 Chemical Analysis after sintering.

No.	Material	C	O	Note
1	DistaloyAE+0.5%Gr.	0.48%	0.02%	After sintering
2	DistaloyAE	< 0.01%	0.01%	= ditto =
3	AstaloyCrM+0.5%Gr.	0.35%	0.01%	= ditto =
4	AstaloyCrM+0.3%Gr.	0.16%	0.01%	= ditto =

Table 4 Mechanical Properties of Sintered Specimens.

	SP.	Hardness on Surface [Hv10]	Tensile Strength [MPa]	Elongation [%]	Impact Energy [J]
DistalloyAE 0.48%C	No	290	864	3.34	34
	Yes	468	873	2.91	33
DistalloyAE Carburizing	No	468	950	2.96	25
	Yes	635	975	2.85	23
AstaloyCrM 0.35%C	No	281	873	3.81	39
	Yes	476	874	3.60	38
AstaloyCrM 0.16%C Carburizing	No	539	984	1.30	23
	Yes	689	1015	1.09	20

Table 5 Fatigue Strength and Residual Stress for each process condition.

Material	Sintered Density [g/cm ³]	Carburizing	Shot Peening	Fatigue Strength [MPa]	Surface Residual Stress [MPa]	Maximum Residual Stress [MPa]
DistalloyAE + 0.48%C	7.48	No	No	210	—	—
			CSP	340	-584	-697
			USP	340	-739	-739
DistalloyAE	7.53	Yes	No	390	—	—
			CSP	390	-818	-1064
			USP	390	-910	-1068
AstaloyCrM + 0.35%C	7.38	No	No	(310)	-69	-93
			CSP	390	-588	-694
			USP	390	-656	-715
AstaloyCrM + 0.16%C	7.39	Yes	No	470	-100	-146
			CSP	420	-654	-1065
			USP	470	-943	-1243

Table 4の実測値と比較すると均一組織のAstaloyCrMでは各相毎の寄与率で或る程度の引張強度が推定可能であり、不均一組織ではフェーズとなる或る相の影響により一概に各相の強度分担率で述べられないと考えられる。

AstaloyCrMにおいて硬度、引張強度等がDistalloyAEより向上していることは上記から説明できる。

次に通常ショットピーニング処理が機械的性質にどのような影響を与えるかについて調査した。何れの材料においても処理後に表面ヴィッカース硬度が向上し引張強度もやや向上するが、伸び・衝撃値が低下する。これは表面に加工誘起マルテンサイトが表われ、その影響が相対的に試験片の深い部分にまで表われたと考慮される。このことから部品の断面積に応じた深さ方向の表面処理効果を最適化することが重要であるのがわかる。

3.3 疲労強度

焼結及び浸炭焼入れ後の疲労強度を残留応力と共にTable 5

に示した。結果として高温焼結品において部分拡散合金材料であるDistalloyAEよりも予合金鋼材料のAstaloyCrMにおいて高い疲労強度が得られた。これは或る程度高温焼結品においてAstaloyCrMの静的機械的性質が優れている結果から予測されることであるが、引張強度に対する疲労強度の比に着目してみると不均一組織であるDistalloyAE材料よりも均一組織であるAstaloyCrM材料の疲労強度比が約0.1高くなっている。このことから高疲労強度を要求される部品には強度レベルからだけ判断するとAstaloyCrMのような均一組織材料が適している。ここでDistalloyAE製の焼結体の疲労強度比が小さい。平面曲げ疲労強度試験方法を採用したことにもよるが表面組織の制御不足も考えられる。

疲労限度線図から推定すると主に降伏強度の寄与が大きいのと考えられる。Table 6に降伏点強度に対する疲労強度の比も同時に示した。引張強度に対する比よりもより一定値に近づく。よって定性的に降伏強度が高い程、疲労強度の向上に寄

Table 6 Fatigue Strength Ratio against Tensile Strength and Yield Strength.

Material	Carburizing.	Shot Peening	Fatigue Ratio F.S. / T.S.	Yield Strength [MPa]	Fatigue Ratio F.S. / Y.S.
DistaloyAE + 0.48%C	No	No	0.24	450	0.47
		CSP	0.39	-	-
		USP	0.39	-	-
DistaloyAE	Yes	No	0.41	690	0.56
		CSP	0.40	-	-
		USP	0.40	-	-
AstaloyCrM + 0.35%C	No	No	0.36	620	0.50
		CSP	0.45	-	-
		USP	0.45	-	-
AstaloyCrM + 0.16%C	Yes	No	0.48	730	0.64
		CSP	0.41	-	-
		USP	0.46	-	-

Fig.4 Fatigue Strength of DistaloyAE with 0.5%C after sintering.

与すると考えられる。材料疲労強度の予測化の為に更にデータの蓄積を行って行く。

ショットピーニング処理の効果は焼結後に行うことで顕著なる向上が認められる。これは表面に加工誘起マルテンサイト組織の硬化領域が表出し、それに伴う圧縮残留応力により説明できるであろう。同様の理由により浸炭処理も疲労強度向上にかなり有効であった。但し、今回の実験では浸炭焼入後のショットピーニング処理の効果を明確に示すことができなかった。考えられる要因として、①ショットピーニング処

理時のエッジ欠陥、②表面近傍組織の見落とし、③ショットピーニング処理前組織のチューニング不足等が考えられるが、これらについては再実験中である。特に疲労の初期クラック発生に関する研究⁹⁾は試験方法についての再考を示唆している。DistaloyAEとAstaloyCrMの焼結体の疲労強度向上例をそれぞれFig.4及びFig.5に示す。

3.4 表面粗さ

応力集中という点から表面粗さも疲労強度に影響を与える因子の1つである。加工した表面状態により疲労強度が異な

Fig.5 Fatigue Strength of AstaloyCrM with 0.35%C after sintering.

Table 7 Roughness of each specimens before and after conventional shot peening or ultra shot peening.

	Material	Rz (μm) before S.P.	Rz (μm) after S.P. CSP/USP
1	DistaloyAE + 0.5%Gr Sintered Parts	9.02	29.60 / 8.58
2	DistaloyAE Carburizing & Tempering	7.45	9.90 / 3.94
3	AstaloyCrM + 0.5%Gr. Sintered Parts	8.99	24.10 / 6.95
4	AstaloyCrM + 0.5% Gr. Carburizing & Tempering	9.06	6.00 / 4.50

るのは知られている^{9,10)}。そこで焼結後及び浸炭後表面・ショットピーニング処理後における表面粗さの変化を調べた結果をTable 7に示した。計測は断面曲線を十点平均粗さであるRzで表した(JIS B0601-1982)。これから通常ショットピーニングを焼結後品に適用すると、かなりの肌荒れが生じることがわかる。また浸炭処理後に通常ショットピーニング処理を適用した場合は表面粗さが著しく悪くなることは無かった。一方超音波ショットピーニング処理においては浸炭前の焼結体に適用しているにも関わらず、表面粗さは改善する傾向にある。今後の高強度材料開発の有効な指針となるであろう。

表面粗さの低下により疲労強度の低下が懸念されたが、本材料においてRzが20ミクロン以上であっても圧縮残留応力の寄与により疲労強度が向上することがわかる。

3.5 圧縮残留応力

圧縮残留応力についてはCr管球を用いたX線応力測定装置にて表面から深さ方向にエッチング除去しながら深さ方向の圧縮残留応力分布を計測した。その結果については前出の

Table 5に示している。また通常ショットピーニング処理と超音波ショットピーニング処理時の圧縮残留応力分布を深さ方向に計測したのがFig.6及びFig.7である。疲労強度向上には疲労亀裂発生を抑制し、疲労の伝播を遅くすることが大切である。表面硬化や表面圧縮残留応力の付与は前者に貢献し、有効硬化深さを増加させること及び圧縮残留応力分布の領域拡大は後者に貢献する。実際の部品では両者を考慮した工程が考慮されている。二段ピーニング処理等はその典型例である。

表面の圧縮残留応力の寄与を試験片に作用する引張応力分布を考えれば、表面の圧縮残留応力は表面の平均応力を圧縮側にシフトさせる。これが疲労強度の向上に寄与することになる。疲労限度線図の平均応力が負側へ(圧縮側へ)シフトしたことで同一である。つまり応力比 $R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$ が-1より小さいと疲労破壊までの応力振幅は大きくなり、これより大きいと平均応力が正側へ(引張側へ)シフトし、疲労限度までの応力振幅は小さくなる。

Fig.6 Profile of Residual Stress after Conventional Shot Peening.

Fig.7 Profile of Residual Stress after Ultra Shot Peening.

殆どの実部品では3次元的に応力プロファイルを考察しなければならない。このことは深さ方向で変化して行く負荷応力プロファイル・硬度又は金属組織の変化・残留応力分布の変化等を全て考慮する必要がある。

超音波ショットピーニング処理後の残留応力分布が浅く、しかも Fig.4 及び Fig.5 の S-N 曲線の傾きが小さい。この理由は曲げモーメントが加わったときの高負荷時と低負荷時の深さ方向の応力分布から説明可能である。つまり高負荷時には表面の引張応力が増加し、応力プロファイルの傾きが大きくなるため、表面近傍で負荷と圧縮残留応力の合力のピークが発生し易い。Fig.8は上面に引張・下面に圧縮のモーメントが働いた場合の模式図であり、一点鎖線は応力の中立軸を示す。曲線部分が残留応力効果である。よって亀裂発生後は疲労破断面の割合が小さく静的破断面の割合が増加する。これが表面圧縮残留応力のみを増加させても高負荷側で疲労寿命が向上しない理由である。よって S-N 曲線の傾きが小さくなる理由であると考えられる。疲労亀裂の進展速度を抑制

Fig.8 Schematic Drawings of residual stress of Fatigue Strength Bars when bended.

する為にも残留応力プロファイルは或る程度の深さまで必要である。

残留応力分布の効果及びシミュレーションについては幾つかの研究¹¹⁻¹³⁾がなされている。ショット時のショット粒と塑

性域の模式図をFig.9に示す。また溶製材料のSCM420Hを浸炭焼入した材料にショットピーニングを行い、圧縮残留応力分布の実測値とY. F Al-Obaideの式¹²⁾による計算で最大圧縮残留応力深さ αh_p の係数 α を0.15として求めたピーク値をFig.10に示した。

Fig.9 Schematic Drawings when shot peened.

実測値とのずれが生じた理由として金属組織・硬度が表面から内部へと徐々に変化していることが考えられる。これをどう計算に取り入れるかが今後の課題である。

3.6 肌焼鋼との比較

歯車等の高強度用材料として代表的なものがJIS規格SCM420等の浸炭焼入肌焼鋼である。最近の小型化の要求に伴い部品の高強度化が図られており、その1つの手法が浸炭焼入焼戻し後のショットピーニング処理である^{14,15)}。その疲労強度向上のプロセスを現時点で比較したものがTable 8である。また引張強度と疲労強度との関係を模式的に示したのがFig.11である。小さいダイヤ印が鉄系溶製材料のデータ、三角形印が鋳造アルミニウム合金、丸印が粉末材料のDistaloyAEとAstaloyCrMである。粉末材料は平面曲げによる疲労強度のデータを用い、他の材料は回転曲げのデータを参照した^{16,17)}。

溶製材の場合、素材を鍛造→加工→浸炭焼入焼戻し→ショットピーニングで疲労強度の向上を図っている。このショットピーニング技術においては各社ノウハウを持っている。

Fig.10 Profile of Residual Stress of Case hardened SCM420H after Shot Peening and Maximum Peak of Residual Stress when calculated.

Table 8 Fatigue strength of PM steels compared to case hardened wrought steel.

Material	After Sintering or Forging	After Carburizing Tempering	After Shot Peening
SCM420H	410-460MPa	520-550MPa	800-850MPa
DistaloyAE	210-250MPa	390MPa	390MPa
AstaloyCrM	310-350MPa	470MPa	470MPa

Fig.11 Fatigue Strength versus Tensile Strength of Cast Aluminum, Steel Plate, Case Hardening Steel and PM steels.

ショットピーニング技術そのものの日本における最初の応用例は黎明期のトヨタ自動車製と富士重工業製の国産自動車にまで遡る。

一方、焼結体の場合、粉末成形－焼結－浸炭焼入焼戻－ショットピーニングで疲労強度の向上を試みた。

結果は溶製材においては浸炭焼入にショットピーニングの組合せにより格段の疲労強度向上が図れるのに焼結体においては組合せによる相乗効果が本実験では得られなかった。

理由としては疲労強度の項でも述べているが、その他に試験片の寸法効果も考慮せねばならない。次回の実験においては考慮すべき項目である。

焼結体の場合、密度の影響と焼結体に適した浸炭焼入処理を行い理想の金属組織を得る事が疲労強度向上に重要であると考えられる。焼結体の疲労強度向上が今後の課題であり、基礎データを蓄積し工程を最適にチューニングすることにより疲労強度の更なる向上を図って行く。

4 ま と め

(1) 高温焼結鋼の疲労強度向上には浸炭焼入効果及びショットピーニング効果が認められる。今までにない高疲労強度が得られた。

DistaloyAE: 390Mpa, AstaloyCrM: 470Mpa であった。

(2) CSP 及び USP は焼結品の疲労強度向上並びに欠陥品の品質安定化の作用が認められる。

(3) 焼結品への通常ショットピーニング処理では表面が粗くな

るにも関わらず、疲労強度の向上を図ることができた。条件の最適化で更なる効果が期待できる。

(4) 超音波ショットピーニング処理は表面粗さを若干改善する傾向があり、今まで懸念されてきた表面品質の低下の心配を払拭できる方法である。特に最表面の改質に期待できる。

(5) 疲労強度に寄与する圧縮残留応力は浸炭焼入とショットピーニング処理との組合せにより最大となる。今回は組合せ効果を得ることができなかったが、エッジ欠陥・寸法効果を取り入れた表面近傍組織のチューニングにより更なる改善を図りたい。

謝 辞

本実験の趣旨を御理解頂き、多大なる御協力を頂いた東洋精鋼株式会社殿には心より御礼を申し上げます。

文 献

- 1) O.Eriksson et al: Binder of new pre-alloyed Cr/Mo steel powder released by Höganäs AB during 1998 Powder Metallurgy World Congress, 1.1-5.10.
- 2) U.Engström: "Evaluation of Sinter Hardening of Different PM Materials", Advances in Powder Metallurgy & Particulate Materials, Part 6, (2000)5.147-5.157.
- 3) C.Lindberg et al: "Mechanical Properties of Warm Compacted AstaloyCrM", PM2Tec (2000) MPIF, New York, 5.147-5.157.
- 4) K.Kanno, Y.Takeda, B.Lindqvist, S.Takahashi and K.Kanda:

- "Sintering of Prealloy 3Cr-0.5Mo Steel Powder in a Carbon/Carbon Composite Mesh Belt Furnace", PM2Tec, Orlando, (2002)13.14-13.22.
- 5) 本田忠敏: "鉄系焼結部品の疲労強度特性の現状と課題", 粉体および粉末冶金, 44(1997)475-482.
- 6) Kubaschewski Evans Alcock: "Metallurgical Thermo Chemistry", 4th Edition, by Pergamon Press Ltd, Headington Hill Hall, Oxford 4 & 5 Fitzroy Square, London W.1, 421-429.
- 7) 日本鉄鋼協会編: "鋼の熱処理 改訂5版", 丸善, (1979)708-709.
- 8) A.Bergmark et al: "Fatigue Properties of Cu-C At Two Density Levels", PM Euro 2001, Volume 2, 110-115.
- 9) 河本實他共著: "金属の疲れと設計", コロナ社, (1972)255-256.
- 10) 中村宏他共著: "機械の疲労寿命設計", 養賢堂, (1983)282.
- 11) H.Berns et al: "Influence of Residual Stresses on Crack Growth", Impact Surf Treat, (1986)31-44.
- 12) Y.F.Al-Obaid: "A Rudimentary Analysis of Improving Fatigue Life of Metals by Shot-Peening", Journal of Applied Mechanics, 57(1990)307-312.
- 13) 渡邊吉弘: "ショットピーニングのピーニング効果に関する基礎的研究", 博士論文, (1995).
- 14) 紅林豊, 秦野敦臣: "浸炭鋼の疲れ特性に及ぼす Si, V の影響", 電気製鋼, 67(1996)34-43.
- 15) 林暢彦, 東海林友紀: "強ショットピーニングの効果", いすゞ技報, 第 87 号, (1992)90-94.
- 16) 軽金属協会編: "自動車のアルミ化技術ガイド", 第 3 版, (1993)17-18.
- 17) 秦野敦臣, 並木邦夫: "浸炭鋼の疲れ強さにおよぼすショットピーニングの影響", 電気製鋼, 63(1992)22-31.