HIP 処理による SMF3035 焼結材の回転曲げ疲労における切欠感度*

西谷 弘 信^{*1}, 藤 崎 渉^{*2}
田 中 哲 志^{*3}, 田 中 洋 征^{*2}Notch Sensitivity of HIP-sintered SMF 3035 under
Rotating Bending FatigueHironobu NISITANI, Wataru FUJISAKI,
Satoshi TANAKA, and Hiroyuki TANAKA

Recently, many high-performance sintered materials have been produced by hot isostatic pressing(HIP). In order to clarify the fatigue behavior of HIP-sintered SMF3035(HIP'ed SMF3035), rotating bending fatigue tests of plain and notched specimens were carried out and optical microscopic observations were made successively on the fatigue process by using the plastic replica method. The main results obtained are as follows. (1) In plain specimens, the crack initiates from an inclusion or a minute in-coherent structure. (2) The fatigue limit of plain specimens is determined by the limiting condition for propagation of a micro crack. (3) Crack initiation lives are smaller than 10% of the life for a fracture. (4) The value of the notch root radius at the branch point is nearly equal to 0.5 mm. This means that the present material is not as notch-sensitive as the steel having nearly the same carbon content.

Key Words: Fatigue, Sintered Materials, Notch, HIP, Rotating Bending Fatigue, HIP'ed SMF3035, Successive Observation, Nonpropagating Microcrack, Branch Point, Notch Sensitivity

1. 緒 言

HIP(熱間等方加圧)処理によれば, 従来の焼結技術では得られない優れた特性が得られるので, 最近の新素材に対するニーズの高まりとともにこの処理が急速に普及しつつある^{(1)~(9)}. また, HIP 処理により作られた焼結材料(以下ではこれを HIP 焼結材と呼ぶ)は繰返し荷重を受ける主要な機械部品としての用途も増加しつつある⁽⁸⁾. したがって, HIP 焼結材の疲労強度特性を知ることは実用上重要である.

本研究は, HIP 焼結材の疲労強度特性を明らかにする手始めとして, SMF 3035 HIP 焼結材の平滑試験片および切欠試験片の回転曲げ疲労挙動を調べたものである. 特に注目した項目は, 平滑試験片の破断の起点を明らかにすることおよび溶製鋼材料(炭素鋼)や従来の焼結材料と本材料の切欠感度を比較することである.

2. 供試材, 試験片および実験方法

素材は $\phi 125 \times 160$ mm の SMF 3035(JIS 規格⁽¹⁰⁾)である. その化学成分を表 1 に, 機械的性質を表 2 に示す. 原料粉の鉄粉は神戸製鋼所製アトメル 300 M を, グラファイトは日本黒鉛工業の ACP を使用した. 図 1 に試験片製作の手順を示す. 素材を作るための HIP 焼結処理に先立って 294 MPa, 70 S の CIP 処理を行った. この HIP 焼結材の焼結密度は 7.82 g/cm^3 であ

表 1 化学成分(%)

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr
0.60	<0.01	0.21	0.01	0.01	0.01	0.02	0.03

表 2 機械的性質

M P a			%	
σ_{sl}	σ_B	σ_T	δ	ψ
330	507	717	19	34

σ_{sl} : Lower yield point
 σ_B : Ultimate tensile strength
 σ_T : Actual breaking strength
 δ : Elongation
 ψ : Reduction of area

* 昭和 63 年 10 月 18 日 第 66 期全国大会講演会において講演, 原稿受付 平成元年 3 月 13 日.

^{*1} 正員, 九州大学工学部 (〒813 福岡市東区箱崎 6-10-1).

^{*2} 正員, 福岡県北九州工業試験場 (〒807 北九州市八幡西区則松 3-6-1).

^{*3} 正員, 九州産業大学工学部 (〒813 福岡市東区松香台 2-327).

図 1 試験片製作の手順

(a) 縦断面 (b) 横断面

図 2 組織写真 50 μm

(a) SEM(二次電子像) (b) EPMA(特性 X 線像)

図 3 SEM, EPMA 写真

る。図 2 に試験片の縦断面、横断面の組織写真を示す。基底はパーライト・フェライト混合組織である。HIP 処理の等方加圧という特徴により、両断面における組織の方向性はほとんど認められない。図 3 に SEM, EPMA 写真を示す。組織には MnS を主体とする微細な介在物が見られる。図 4 に応力-ひずみ線図を示す。

図 5 に試験片の形状寸法を示す。試験片 (a) の切欠係数は約 1.05 であり実質上平滑試験片とみなすことができる。試験片 (b) の切欠きは 60° V 形で、切欠半径 $\rho = 1.0, 0.3, 0.1$ mm である。試験片は製作後、すべて電解研磨で表面層を 20 μm 程度取り除いたのち疲労試験に供した ($\rho = 0.1$ mm のみは 5 μm 程度除去)。

図 4 応力-ひずみ線図

(a) 平滑試験片

(b) 切欠試験片

図 5 疲労試験片の形状寸法

電解研磨液はりん酸 2 600 cc にゼラチン 50 g, しゅう酸 50 g を溶かしたものである。平滑試験片の疲労被害の表面観察は応力繰返し途中, 所定の繰返し数ごとに試験機を止めて表面より採取したレプリカに真空中でクロムを蒸着させたものについて金属顕微鏡で行った。疲労試験には小野式回転曲げ疲労試験機(容量 15 N・m, 回転数約 3 000 rpm)を用いた。

3. 実験結果および考察

3.1 S-N 曲線と疲労過程 図 6 に平滑試験片と切欠試験片の S-N 曲線を示す。応力は最小断面の公称曲げ応力である。平滑試験片の場合, 折点は 5×10^6 回付近に存在し, 疲労限度 σ_{w0} は 220 MPa である。切欠試験片の場合, 折点は平滑試験片に比べ低繰返し数側となり, 破断限界としての疲労限度は ρ が 1.0, 0.3 および 0.1 mm でそれぞれ 150, 130 および 125 MPa である。

平滑試験片の疲労限度比 σ_{w0}/σ_B は 0.43 であり, 一般の炭素鋼で得られる値とほぼ等しい⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。従来の焼結処理による SMF 3035 (焼結密度 6.8~7.0 g/cm³ 程度)の平滑試験片の疲労限度は 100~150 MPa 程度であり⁽¹³⁾, 本平滑試験片の疲労限度はこれの 1.5~2.2

倍である。これは HIP 焼結材では焼結密度 (7.82 g/cm³) が空けきがないときの値に近く欠陥の寸法が十分に小さくなっていることによる。

図 7 は平滑試験片に $\sigma > \sigma_{w0}$ の応力を繰返したときのき裂伝ば曲線を, 図 8 は平滑試験片に $\sigma = \sigma_{w0}$ を繰返したときの微視的停留き裂の伝ば曲線を示したものである。また, 図 9 および 10 は, き裂伝ば曲線に対応させて, それぞれ $\sigma > \sigma_{w0}$ および $\sigma = \sigma_{w0}$ を繰返した場合の表面状態の変化を示したものである。すなわち図 9 は破断する場合 ($\sigma = 1.2\sigma_{w0}$) で, 図 10(a), (b) は発生したき裂が停留する場合である。なお, 図 9 中の矢印はき裂先端を示している。

疲労限度より高い応力を繰返す場合(図 7, 図 9),

図 7 平滑試験片におけるき裂伝ば曲線

図 8 平滑試験片における微視的停留き裂の伝ば曲線 ($\sigma = \sigma_{w0}$)

図 6 平滑試験片, 切欠試験片の S-N 曲線

**1 表面観察用の試験片は, 電解研磨後さらにアルミナ研磨, ナイタル腐食を行った。

図 9 平滑試験片の疲労過程 ($\sigma=1.2\sigma_{w0}$, $N_f=4.8\times 10^5$) 図 10 平滑試験片の疲労過程 ($\sigma=\sigma_{w0}$) 図 10 平滑試験片の疲労過程 ($\sigma=\sigma_{w0}$)

き裂は介在物もしくは微細な組織の不整合部分から発生しているようである(図 9 中 $N=1.1\times 10^5$)。発生時期は破断寿命の約 10 % 程度以下である(図 7)。

疲労限度の応力を繰返す場合(図 8, 図 10)も、き裂は、破断する場合と同様、介在物もしくは微細な組織の不整合部分から発生し、その後はすべりを伴いながらわずかに伝ばし、折点を示す繰返し数付近で停留する[図 10(a)]。また、介在物と微細な組織の不整合部分を連結するような微視的停留き裂も観察された[図

10(b), 最終仕上げは電解研磨]。いずれにしろ, 10^7 回後には発生したき裂はその伝ばを停止している。したがって, SMF 3035 HIP 焼結材の疲労限度も、一般の炭素鋼同様、微視的き裂の伝ば限界で決まることになる。

3.2 疲労における切欠感度 図 11 に切欠試験片の σ_{w1} , σ_{w2} と応力集中係数 K_t の関係を示す。ここで, σ_{w1} は平滑試験片の疲労限度で認められるのと同程度の疲労被害を生ずる応力を意味する⁽¹⁴⁾。 σ_{w2} はいわゆる停留き裂が存在する範囲における破断限界応力である⁽¹⁴⁾。

図 12 に切欠試験片における切欠底の縦断面写真を示す。 σ_{w2} を 10^7 回繰返した場合の切欠底には、このように停留き裂が存在している。

図 11 によると、き裂が停留するか否かの限界である分岐点の切欠半径 ρ_0 は約 0.5 mm である。分岐点より鋭い切欠きがあっても σ_{w2} はほぼ変わらない。

表 3 は, SMF 3035 HIP 焼結材および炭素鋼の機械

的性質と ρ_0 の値を比較のために示したものである⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾。図 13 は、SMF 3035 HIP 焼結材および炭素鋼焼なまし材の σ_B と ρ_0 の関係を示したものである。

図 11 σ_{w1} , $\sigma_{w2} - K_t$ 曲線

図 12 10^7 回後の切欠試験片の停留き裂
($\rho=0.1\text{mm}$, $\sigma=125\text{MPa}$, $N=1.0 \times 10^7$)

図 13 SMF 3035 HIP 焼結材と炭素鋼焼なまし材の σ_B と ρ_0 の値

SMF 3035 HIP 焼結材の ρ_0 ($\approx 0.5 \text{ mm}$) は炭素含有量が近い S 50 C 焼なまし材の ρ_0 ($\approx 0.25 \text{ mm}$) より大きい。すなわち、同様な化学成分をもっている一般の炭素鋼と HIP 焼結材では ρ_0 は大きく異なり、本 HIP 焼結材の ρ_0 の値はむしろ引張強さが同程度の S 20 C 焼なまし材のそれに近い。

表 4 は、微小欠陥の影響を受けやすい σ_{w0} と受けにくい σ_B に注目して、SMF 3035 HIP 焼結材と SMF 4 種相当の通常焼結材⁽¹⁷⁾とを比較したものである。SMF 3035 HIP 焼結材の σ_{w0}/σ_B は炭素含有量が同程度の SMF 4 種相当の通常焼結材に比べると大きい。これは欠陥の寸法が通常焼結材におけるより HIP 焼結材において小さいことによる。なお、通常焼結材においても炭素含有量が低下すると σ_{w0}/σ_B は大きくなるが、これは欠陥寸法によるものではなく炭素含有量が低いほど切欠きに対して鈍感となる現象に対応していると思われる。

以上からわかるように、HIP 処理による焼結法は、従来の焼結法に比べ欠陥の密度と寸法を小さくすることができるので、静強度や疲労強度の改善に有効な方法の一つである。特に、疲労強度の改善効果は顕著である(表 4)。

表 3 SMF 3035 HIP 焼結材と炭素鋼の機械的性質と ρ_0 の値

Material		σ_B (MPa)	σ_{s1} (MPa)	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	ρ_0 (mm)
HIP'ed SMF3035		507	330	—	0.5
Annealed S10C		373	203	—	0.6
" S20C		470	279	—	0.5
" S30C		537	309	—	0.4
" S35C		600	336	—	0.4
" S45C		632	364	—	0.25
S50C	Annealed	674	347	—	0.25
	Quenched & tempered	1010	—	858	0.1
	"	1250	—	1133	0.1

σ_{s1} : Lower yield point

$\sigma_{0.2}$: 0.2% proof stress

表 4 SMF 3035 HIP 焼結材と SMF 4 種相当の通常焼結材⁽¹⁷⁾における σ_{w0}/σ_B の比較

Material	C (%)	γ (g/cm ³)	σ_{w0} (MPa)	σ_B (MPa)	σ_{w0}/σ_B
HIP'ed SMF3035	0.60	7.82	220	507	0.43
SMF4030 equivalent	0.57	6.41	147	414	0.36
SMF4020 equivalent	0.08	6.21	99	216	0.46

4. 結 論

SMF 3035 HIP 焼結材について、平滑試験片の回転曲げ疲労過程を連続観察するとともに、切欠試験片の切欠感度を調べたところ、次の結論が得られた。

(1) 疲労限度以上の応力を繰返す場合、き裂は介在物あるいは微細な組織の不整合部分から発生する。そのき裂の発生時期は破断寿命の約 10 % 程度以下である。

(2) SMF 3035 HIP 焼結材の平滑試験片においても炭素鋼と同様に、微視的停留き裂が認められる。したがって、HIP 焼結材の疲労限度は、微視的き裂の伝ば限界条件で決まっているといえる。

(3) 分岐点の切欠半径 ρ_0 の値は約 0.5 mm であり、本材料の切欠感度は炭素量が同程度の炭素鋼に比べて低く、引張強さが同程度の炭素鋼とほぼ等しい。

(4) HIP 処理による焼結法は有力な疲労強度改善法の一つである。

終わりに、種々の資料をご提供いただいた(株)神戸製鋼所、実験に協力された九産大大学院生の寺西、大

橋君ならびに卒研生の境、安部、北原、松尾君、北九州工業試験場の高橋、三沢氏に深く感謝する。なお、この研究は昭和 63 年度通産省地域技術活性化事業の一環として行われたものである。

文 献

- (1) 小泉・西原編, 等方加圧技術, (1987), 日刊工業新聞社.
- (2) 井上, R&D 神戸製鋼技報, 32-2(1988), 77.
- (3) James, P. J. 編, HIP と CIP, (1986), 163, 日刊工業新聞社.
- (4) Abkowitz, S. and Rowell, D., *J. Met.*, 39(1986-8), 36.
- (5) 島・中西, 材料, 37-412(1988), 70.
- (6) 大塚・ほか 3 名, 材料, 36-404(1987), 462.
- (7) 土井, 機械の研究, 35-12(1983), 1359.
- (8) 土井, 機械の研究, 36-4(1984), 497.
- (9) 土井, 機械の研究, 36-8(1984), 959.
- (10) 日本規格協会編, JIS-Z 2550, (1983).
- (11) 西谷, 機論, 34-259(1968), 371.
- (12) 西谷・千代, 機論, 40-329(1974), 41.
- (13) 日本粉末冶金工業会編, 焼結機械部品, (1987), 116-117, 技術書院.
- (14) 西谷・田中, 機論, 50-451, A(1984), 301.
- (15) 西谷編, 疲労強度学, (1985), 48, オーム社.
- (16) 西谷・遠藤, 機論, 50-463, A(1985), 784.
- (17) 岸本・ほか 2 名, 材料, 21-220(1972), 230.