フェライト, マルテンサイトおよび黒鉛からなる三相鋼の
引張強度および疲労強度*末 吉 秀 一^{*1}, 西 谷 弘 信^{*2}
皮籠石 紀 雄^{*1}, 道 山 慎 一^{*3}Tensile and Fatigue Strengths of Triphase Steel Composed of
Ferrite, Martensite and Spheroidal GraphiteHidekazu SUEYOSHI, Hironobu NISITANI,
Norio KAWAGOISHI, and Shin-ichi MICHİYAMA

Tensile tests and rotating bending-fatigue tests were carried out on plain specimens of ferrite-martensite dual-phase steel and ferrite-martensite-spheroidal graphite triphase steel in order to investigate the influence of graphite on the tensile and fatigue strengths of the triphase steel. Both steels have nearly equal microstructure parameters, except for the graphite content. The graphite in the triphase steel barely influences the tensile strength, but lowers the fracture ductility. On the other hand, both fatigue crack initiation and propagation lives decrease with the existence of graphite.

Key Words: Fatigue, Tensile Strength, Ferrite-Martensite Steel, Spheroidal Graphite, Crack Initiation, Small Crack, Crack-Growth Rate

1. 緒 言

被削性, 耐摩耗性, 塑性加工性などを改善する目的で開発された黒鉛鋼⁽¹⁾⁽²⁾は, 引張特性, 疲労特性⁽⁴⁾⁽⁵⁾においても普通の炭素鋼に比べてそんなことないことから, 黒鉛を鋼に分布させることの効果は実用上大きいものと考えられる。

ところで, 近年, 機械の高速化, 軽量化の中で, 各種材料の高強度化がはかられているが, 黒鉛鋼を上述の優れた諸特性を維持したまま高強度化できれば, さらに本材料の広範な適用が可能になる。一般に高強度化した場合, 切欠感度が高まるため, 鋼の中に析出分布させた黒鉛は疲労特性を低下させる原因になることが考えられるが, 高強度黒鉛鋼に関する研究は, 疲労特性はもとよりその他の諸強度特性についてもまったくみられない。

そこで, 本研究では, フェライト, マルテンサイトの組織の中に黒鉛を析出分布させた三相鋼を作製し, 黒鉛鋼を高強度化した場合の引張強度および疲労強度

を調べ, フェライト, マルテンサイトからなる二相鋼の結果と比較検討し, 両強度特性におよぼす黒鉛の影響を調べた。本研究は, 低降伏比, 高強度, 高延性を特徴とするフェライトとマルテンサイトの二相鋼⁽⁶⁾をさらに, 被削性, 耐摩耗性の改善された鋼として利用できる可能性を検討するという点で実用上意義あるものと考えられる。

2. 材料, 試験片および実験方法

供試材は, 高周波炉で大気中溶解した 50 kg の 2 種類(炭素含有量以外の成分はほぼ等しい)の鋼塊を直径 20 mm に熱間鍛伸したものである。

表 1 に化学成分を示す。Si と Ni が普通の機械構造用鋼より多く添加されているのは, 黒鉛化促進および焼入れ性を高めるためである。後述のように, 炭素含有量 0.2 % の鋼をフェライトとマルテンサイトの二相鋼として, 0.8 % の鋼をフェライト, マルテンサイトおよび黒鉛の三相鋼として作製するので, 以下ではそれぞれ二相(D. P.)鋼, 三相(T. P.)鋼と記す。

図 1 に, 0.2 % C 鋼および 0.8 % C 鋼をそれぞれ二相化, 三相化するための熱処理条件を示す。図 1 中, W. Q. は水焼入れ, A. C. は空冷を意味している。二相化のための熱処理は一般に行われている方法と同様で

* 平成元年 11 月 8 日 材料力学講演会において講演, 原稿受付 平成元年 4 月 19 日。

^{*1} 正員, 鹿児島大学工学部 (〒890 鹿児島市郡元 1-21-40)。

^{*2} 正員, 九州大学工学部 (〒812 福岡市東区箱崎 6-10-1)。

^{*3} 九州松下電器(株) (〒812 福岡市博多区美野島 4-1-62)。

あるが、二相化前の熱処理は、三相鋼に黒鉛が含まれる点を除いて両鋼の組織寸法が等しくなるように計画したものである。三相鋼の場合、第1、第2および第3段階の熱処理はそれぞれ黒鉛化前処理、部分黒鉛化処理そして黒鉛化していない残留セメンタイトをいったんオーステナイトにしてからマルテンサイト化する三相化処理である。

図2に、熱処理後の組織写真を示す。前述のように、本研究の目的である強度特性におよぼすフェライトとマルテンサイト組織中における黒鉛の影響を明らかにするためには、二相鋼と三相鋼において、黒鉛の有無以外の組織パラメータをできるだけそろえる必要がある。各材の二相化、三相化前の熱処理条件はこのことを考慮して行ったが、図2の組織写真からわかるように、三相鋼で1～数 μm 程度の球状黒鉛が含まれる以外は、いずれの鋼もフェライトと1 μm 程度の大きさをもつマルテンサイトの混合組織である。そして、線分法⁽⁷⁾により測定したマルテンサイト体積率は、二相鋼で27.9%、三相鋼で28.5%とほぼ等しい。三相鋼における黒鉛の体積率は2.13%である。なお、今回

の熱処理で得られた両鋼は、通常の二相鋼に比べて、極めて微細なマルテンサイトの分布した組織となっているのが特徴である。

図3に、引張りおよび疲労試験片の形状、寸法を示す。

引張試験は、島津オートグラフ AG-5 000 A を用いて引張速度(クロスヘッド速度)0.5 mm/minで行った。

疲労試験片は、二相鋼と三相鋼で、加工影響層(特にフェライトの加工硬化層)ができるだけ少なくなかつ等しくなるように、両鋼とも、機械加工の後、電解研磨により直径当たり約30 μm 除去してからさらに、アル

表 1 化学成分

Steel	mass %									
	C	Si	Mn	Al	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo
D.P.	0.21	1.20	0.31	0.039	0.005	0.005	<0.1	2.05	<0.01	<0.01
T.P.	0.82	1.20	0.31	0.035	0.005	0.002	<0.1	2.01	<0.002	<0.01

D. P.: 二相鋼, T. P.: 三相鋼

(a) 二相(D.P.)鋼

(b) 三相(T.P.)鋼

図 1 各材の熱処理条件

(a) 二相鋼

(b) 三相鋼

図 2 各材の組織写真

(a) 引張試験片

(b) 疲労試験片

図 3 引張りおよび疲労試験片の形状、寸法(mm)

ミナを用いて数 μm バフ研磨した。バフ研磨は、新たな加工影響層生成の原因になりうるが、電解研磨による三相鋼中の黒鉛脱落の影響を除くため行ったものである。

疲労き裂長さの測定および表面状態の観察はレプリカ法により光学顕微鏡で行ったが、一部走査形電子顕微鏡 (SEM) による直接観察も行った。き裂長さとしては、表面に沿って測った円周方向の長さをとった。引張りおよび疲労破面の観察には SEM を用いた。

疲労試験は、小野式回転曲げ疲労試験機 (容量 15 N・m, 回転数約 50 Hz) で行った。

3. 実験結果および考察

3.1 引張特性 図 4 に、二相鋼と三相鋼の応力-ひずみ曲線を示す。両鋼における応力-ひずみ曲線の差異は小さく、しかもいずれの材料とも明確な降伏点はみられない。したがって、二相鋼の特徴的な加工硬化特性⁽⁶⁾に対し、黒鉛はほとんど影響していない。

表 2 に、二相鋼と三相鋼の引張試験結果および硬さをまとめて示す。0.2% 耐力と硬さは両鋼でほぼ等しく、引張強さも三相鋼が低いもののその差はわずかである。一方、伸びや絞りは二相鋼より三相鋼のほうが小さく、とくに、絞りの減少が顕著である。すなわち、引張特性に対する黒鉛の影響は、強度上はほとんどみられず、均一伸び後の変形特性に現れることがわかる。

図 5 は、二相鋼と三相鋼の引張破面写真である。いずれの材料でもディンプル破面となっているが、三相鋼のディンプルの中心には黒鉛が認められるものもある。

図 4 二相 (D. P.) 鋼および三相 (T. P.) 鋼の応力-ひずみ曲線

り、ディンプル寸法も二相鋼のそれより大きいものが多い、したがって数は少ない。以上のことから、二相鋼では、フェライトとマルテンサイトの界面を起点としたボイド⁽⁸⁾から小さい、多くのディンプルが形成されるのに対し、三相鋼の場合、黒鉛が存在するためボイドの発生が早められ、フェライトとマルテンサイトの界面から発生、成長した小さなディンプルのほかに、

表 2 二相 (D. P.) 鋼および三相 (T. P.) 鋼の機械的性質

	D. P.	T. P.
V_M %	27.9	28.5
$H_V(98N)$	210	217
$\sigma_{0.2}$ MPa	477	479
σ_B MPa	829	813
$\sigma_{0.2}/\sigma_B$	0.58	0.59
δ %	302	25.7
ψ %	61.4	36.2
E_f	0.955	0.451

V_M : マルテンサイト体積率

H_V : ビッカース硬さ

$\sigma_{0.2}$: 0.2% 耐力

σ_B : 引張強さ

δ : 伸び

ψ : 絞り

E_f : 破断延性値 $= \ln \frac{1}{1-\psi}$

(a) 二相鋼

(b) 三相鋼

図 5 二相鋼および三相鋼の引張破面写真

寸法の大きなディンプルが認められるものと考えられる。このことが、二相鋼と三相鋼において、均一変形時の特性値である $\sigma_{0.2}$, σ_B はほぼ等しいのに対し、局部変形をそのまま反映した絞り(破断延性値)に顕著な差異が生じた主な理由である。

3・2 疲労特性 図6に二相鋼と三相鋼のS-N曲線を示す。図6中、 N_f は破断寿命を、 $N_{0.1}$ はき裂長さが0.1mmとなる繰返し数を示している。引張強度の場合、黒鉛の影響はほとんど認められなかったのに対し、疲労強度の場合、き裂発生寿命と破断寿命のいずれも二相鋼より三相鋼のほうが短く、黒鉛により疲労強度が低下している。この傾向は、応力の低下とともに減少し、疲労限度 σ_w は、二相鋼で430 MPa、三相鋼で410 MPaとその差は小さくなる。そして疲労限度比(σ_w/σ_B)で比較した場合、二相鋼で0.52、三相鋼で0.5とほぼ等しいことから、本研究で作製した程度の微小な黒鉛は疲労限度に対しほとんど影響していないことがわかる。なお、これらの材料で得られた疲労限度比は、炭素鋼と合金鋼における疲労限度比の平均値0.5⁽⁹⁾にほぼ等しい。

図7は、二相鋼と三相鋼におけるき裂発生(3% Nitalで腐食後SEMによる直接観察)および伝ば形態(レプリカによる光学顕微鏡観察)を示す表面写真である。一般に、フェライトとマルテンサイトからなる二相鋼のき裂は、フェライト粒内もしくはフェライトとマルテンサイト境界近くに生じたすべり帯より発生

する⁽¹⁰⁾。本研究で作製した二相鋼では、図7(a-1)からわかるように、フェライトとマルテンサイト境界が主なき裂の発生箇所であった。これに対し、三相鋼のき裂は黒鉛から発生している[図7(b-1)]。また、二相鋼に比べ三相鋼の場合、黒鉛を起点とした多くの微小き裂が発生し、それらは頻繁に合体するため、き裂形態はジグザグになっている。

図8は、二相鋼と三相鋼において、疲労限度の応力を 10^7 回繰返した後に認められた停留き裂の写真である。破断する応力を負荷した場合(図7)と同様に、二相鋼ではすべり帯より発生したき裂、三相鋼では黒鉛から発生したき裂が観察され、いずれの材料とも、疲労限度はき裂の伝ば限界で決まることがわかる。停留き裂長さは、両鋼とも約15 μm でほぼ等しい。これは

図6 二相(D.P.)鋼と三相(T.P.)鋼のS-N曲線

(a-1) 二相鋼のき裂発生 ($\sigma_a=500$ MPa, $N_f=2.38 \times 10^5$ cycles)

(b-1) 三相鋼のき裂発生 ($\sigma_a=500$ MPa, $N_f=6.54 \times 10^4$ cycles)

(a-2) 二相鋼のき裂形態 ($\sigma_a=550$ MPa, $N_f=7.65 \times 10^4$ cycles)

(b-2) 三相鋼のき裂形態 ($\sigma_a=550$ MPa, $N_f=1.82 \times 10^4$ cycles)

図7 二相鋼と三相鋼のき裂発生(走査電顕)およびき裂伝ば形態(光学顕微鏡)写真 ↓ 軸方向)

両鋼の疲労限度がほぼ同じでしかもマトリックスとしてのフェライト、マルテンサイト組織もほぼ等しく、したがって、き裂伝ば挙動がほぼ等しくなったためだと考えられる。

図9に二相鋼と三相鋼におけるき裂伝ば曲線を示す。この図9では、縦軸にき裂長さの対数 $\log l$ をとり、横軸に破断寿命を基準とした相対繰返し数 N/N_f をとっている。図9中、矢印はき裂同士の合体を示しているが三相鋼の場合、図7に示したように、極めて多くのき裂が発生するため、微小なき裂の合体が頻繁に起こるので、図9中の合体記号は、比較的長いき裂の合体のみに記してある。全寿命に対するき裂伝ば寿命の占める割合は、二相鋼より三相鋼のほうが大きく、黒鉛の影響はき裂伝ば過程よりき裂発生過程で多少大きい。

図10は、二相鋼と三相鋼におけるき裂伝ば速度とき裂長さの関係である(き裂伝ば速度は、データを滑らかに結んだき裂伝ば曲線から求めた)。等しい応力下で比較すれば、三相鋼のき裂伝ば速度は二相鋼のそれより大きく、き裂伝ば過程でも黒鉛がかなり影響して

いる。なお、いずれの材料でも、各種の炭素鋼や合金鋼⁽¹¹⁾および黒鉛鋼⁽⁵⁾にけると同様に、き裂が短い間はき裂伝ば速度はき裂長さに比例している。

4. 結 論

マルテンサイト体積率とマルテンサイト寸法をそろえた、フェライト、マルテンサイトおよび球状黒鉛からなる三相鋼とフェライトおよびマルテンサイトからなる二相鋼とを作製し、引張試験、回転曲げ疲労試験を行い、黒鉛鋼を高強度化した場合の静強度と疲労強度に対する黒鉛の影響を調べた。得られた結論は次のとおりである。

(1) 0.2%耐力、引張強さ、硬さは、二相鋼と三相鋼でほぼ等しいが、伸び、絞りは二相鋼より三相鋼が小さい。

(2) 疲労き裂の主な起点は、二相鋼ではフェライトとマルテンサイトの境界であるのに対し、三相鋼では黒鉛である。そして、三相鋼のき裂は、二相鋼のそれよりはるかに多く、合体頻度も高い。

(3) 疲労き裂の発生および伝ば寿命は、いずれも二相鋼より三相鋼が短い。したがって、同一寿命に対応する時間強度は二相鋼のほうが大きい。その差は疲労限度に近づくとともに小さくなる。

(4) 二相鋼と三相鋼の疲労限度は、いずれもき裂伝ば限界で決まり、疲労限度、停留き裂寸法も両鋼でほぼ等しい。

図8 二相鋼と三相鋼の停留き裂写真(↑軸方向)

図9 二相(D.P.)鋼と三相(T.P.)鋼のき裂伝ば曲線

図10 二相(D.P.)鋼と三相(T.P.)鋼におけるき裂伝ば速度とき裂長さの関係

文 献

- (1) Bonté, F. R. and Fleishman, M., *Met. Prog.*, **31** (1937), 409.
 - (2) 師岡(日本金属学会鑄造分科会編), 球状鑄鉄の理論と実際, (1966), 407, 丸善.
 - (3) 末吉・ほか2名, 金属誌, **48-1** (1984), 15.
 - (4) 末吉・ほか2名, 金属誌, **48-10** (1984), 965.
 - (5) 皮龍石・ほか2名, 機論, **55-51**, A (1989), 416.
 - (6) 例えば, 高橋・ほか2名, 金属報, **19-1** (1980), 10.
 - (7) 佐久間, 西沢, 金属報, **10-5** (1971), 279.
 - (8) 末吉・ほか3名, 金属学会第99回講演会概要集, (1986-10), 231.
 - (9) 田中・ほか2名, 材料, **36-403** (1987), 348.
 - (10) 例えば, 山元・ほか2名, 材料, **37-417** (1988), 637.
 - (11) 西谷・後藤, 機論, **41-462**, A (1985), 332.
-