DP 鋼のコーキシング効果に及ぼす組織形態の影響*

皮籠石 紀雄^{*1}, 西谷 弘信^{*2}豊 廣 利 信^{*3}, 尾田 安 司^{*2}

Effect of Phase Morphology on Coaxing Effect of Dual-Phase Steels

Norio KAWAGOISHI, Hironobu NISITANI,
Toshinobu TOYOHIO and Yasuji ODA

In order to investigate the influence of microstructure on the coaxing effect, rotating bending fatigue tests were carried out on plain specimens of two kinds of dual-phase steels, Steel A which has a microstructure containing isolated martensite phases in a ferrite phase and Steel B which has a continuous martensite phase filled with ferrite phase. In both steels, nonpropagating cracks were observed at their fatigue limits and the tips of the nonpropagating crack initiated in a ferrite phase or near the phase boundary were blocked from growing by martensite phases. Moreover, the origin of final fracture in coaxing process was the nonpropagating crack initiated at the first stress level. The coaxing effect was more marked in Steel B than in Steel A. The reason was discussed based on the difference in the crack growth path caused by the martensite morphology, that is, the cracks blocked by martensite structures changed the direction of growth and propagated through ferrite structures in Steel A and the cracks in Steel B penetrate the martensite structures.

Key Words: Fatigue, Rotating Bending, Coaxing Effect, Microstructure, Ferrite, Martensite, Nonpropagating Crack

1. 緒 言

平滑材の疲労強度を考える場合、有限寿命域、疲労限度いずれにおいても微小き裂の伝ば挙動が重要な意味をもっている。しかも、微小き裂の伝ば挙動は長いき裂のそれに比べ複雑で特に微視組織の影響を強く受ける。

著者らは、異なる微視組織をもつ数種の炭素鋼を用いて微小き裂の伝ば挙動を詳細に調べ、有限寿命域では全寿命の多くが微小き裂の伝ば期間で占められること、疲労限度は微小き裂の伝ば限界であること、そして、き裂伝ばに及ぼす微視組織の影響は応力レベルに関係なく認められるが、高応力レベルにおけるき裂伝ば抵抗は、組織の平均的な強度を通じて力学的因子で評価できるのに対し、疲労限界およびその近傍におけるき裂伝ばあるいは停留挙動は微視的な組織因子に強く支配されることを明らかにした⁽¹⁾⁽²⁾。

ところで、著者の一人は平滑材のコーキシング効果を検討する場合、微視的停留き裂の存在およびそのき

裂先端の挙動が重要であることを指摘した^{(3)~(5)}が上記のことを考慮すれば、コーキシング効果に及ぼす微視組織の影響を検討することも重要だと考えられる。

そこで本研究では、微視組織形態を変えたフェライト・マルテンサイト二相鋼を用いて回転曲げ疲労試験を行い、微視的き裂の停留挙動さらにコーキシング効果に及ぼす微視組織の影響を検討した。

2. 材料、試験片および実験方法

用いた材料は市販の S15C 圧延丸棒(直径19 mm)である。表1に供試材の化学成分を示す。本研究では、き裂伝ばに対するフェライト、マルテンサイトの組織形態の影響をみるため、主としてフェライトがマルテンサイトを取り囲む孤立材とその逆の組織形態であるマルテンサイトがフェライトを取り囲んだ連結材⁽⁶⁾⁽⁷⁾で実験を行った。各材作製のための熱処理については既報⁽¹⁾⁽²⁾で詳述したので省略する。

図1および表2に熱処理後の各材の組織写真、機械的性質をそれぞれ示す。各材の平均フェライト結晶粒径は、孤立材、連結材でそれぞれ 35 μm, 11 μm である。

図2に試験片の形状、寸法を示す。(a)に示す試験片は、き裂発生個所を限定するため浅い部分切欠きが

* 原稿受付 平成6年5月6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} 正員, 都城工業高等専門学校 (☎ 884 都城市吉尾町 473-1)。

付与してあるが切欠係数は1に近く平滑材とみなせるものである(以下平滑材と呼ぶ)。実験は主として平滑材で行ったが、巨視的停留き裂の挙動を調べるため(b)に示す小穴材も用いた。図2のように機械加工した試験片は、加工後直接表面を直径当たり約40 μ m電解研磨により除去した。すべての試験片は、微視組織とき裂伝ば挙動の関係を明らかにするため3%硝酸アルコール溶液で軽く腐食してから実験に供した。表面の疲労被害の変化およびき裂長さの観察は、試験片表面より採取したレプリカに金を蒸着してから光学顕微鏡を用いて行った。き裂長さは、試験片表面に沿う円周方向の長さ(小穴材の場合小穴径0.3 mmも含む)である。

用いた試験機は容量15 N $\cdot$ m, 回転数約50 Hzの小野式回転曲げ疲労試験機である。

表1 化学成分

	wt. %				
	C	Si	Mn	P	S
S15C	0.15	0.15	0.41	0.014	0.008

表2 各材の機械的性質

Material	$\bar{\sigma}_0$ MPa	$\bar{\sigma}_B$ MPa	$\bar{\sigma}_T$ MPa	ψ %
D.P. steel A	452	728	1150	464
D.P. steel B	473	834	1365	509

D. P. Steel A: 孤立材

D. P. Steel B: 連結材

(a) 孤立材 (Steel A)

(b) 連結材 (Steel B)

図1 各材の組織写真(写真中、白い部分がフェライトで、黒い部分がマルテンサイトである)

3. 実験結果および考察

3.1 S-N 曲線とコーキシング効果 図3に孤立材と連結材のS-N曲線とコーキシング試験結果を示す。疲労限度 σ_w は、孤立材で260 MPa, 連結材で390 MPaである。コーキシング試験は、初期応力を $\sigma_{a1} = \sigma_w - 5$ (MPa)とし、応力増分は、孤立材で5, 10, 20 MPa, 連結材で10, 20 MPaで行った。図中に記した数字は試験片番号で、プライム(')のついた数字はその試験片の最終応力 σ_f での破断寿命を示している。両材とも、コーキシング効果が認められ、特に連結材に

切欠きの詳細

(a) 平滑材

小穴の詳細

(b) 小穴材

図2 試験片の形状, 寸法 [mm]

図3 S-N 曲線とコーキシング効果

において顕著である。

図4に両材の停留き裂 $\{\sigma_a = \sigma_w - 5[\text{MPa}]\}$ の伝ば曲線の一例を示す。両材とも、疲労限度の応力のもとでは、繰返しの初期に発生したき裂の伝ば速度は徐々に低下し、ついに停留する。き裂が停留する繰返し数は、多くの鋼の結果⁽⁸⁾と同様に $S-N$ 曲線の折れ点におけるそれとほぼ対応している。図に示した両材の停留き裂長さは、孤立材で約 $110\ \mu\text{m}$ 、連結材で約 $22\ \mu\text{m}$ である。このように、停留き裂寸法は後述の表3に示す結果も含めて平均フェライト結晶粒径の1～数倍である。

3・2 コーキシング過程におけるき裂伝ば挙動

図5は、疲労限度よりわずかに高い応力 $(\sigma_a = \sigma_w + 10[\text{MPa}])$ を負荷した場合の孤立材と連結材における表面状態の変化を示したものである。図中矢印はき裂先

図4 停留き裂の伝ば曲線 $(\sigma_a = \sigma_w - 5[\text{MPa}])$

端を示している。

図6は、図5におけるき裂伝ば速度の変化をき裂長さとの関係で示したものである。図中、プロット点に付した短い矢印はき裂が合体したことを、長い下向きの矢印はき裂伝ば速度が 10^{-11} m/cycle 以下であることを意味している。図5、6からわかるように、破断する応力を繰返す場合、いずれの材料でもき裂は繰返しの初期に発生するが発生個所は孤立材でフェライト粒界近傍またはフェライト粒内、連結材では多くの場合フェライト粒内である。そして、前報⁽¹⁾⁽²⁾で詳細に報告したように、初期伝ばにおいては、フェライト粒界あるいはマルテンサイトがき裂伝ばに対し障害となり組織の影響を反映した速度変動の大きな伝ば挙動を示すが、き裂がある長さ以上になると伝ば速度の変動は小さくなる。

図7に両材のコーキシング過程における表面状態の変化を示す。破断する応力を繰返す場合と比較すれば、き裂密度は低いものの、いずれの材料でもき裂発生および伝ば挙動また組織の影響等はほぼ同様である。コーキシング過程における各材ごとの特徴を記すと次のようになる。

(a) 孤立材 図に示した例は、応力増分が5 MPa の場合である。この例では1段めの応力で、フェ

(a) 孤立材 $(\sigma_a = 270\text{ MPa}, N_f = 1.28 \times 10^6\text{ cycles})$

(b) 連結材 $(\sigma_a = 400\text{ MPa}, N_f = 7.76 \times 10^5\text{ cycles})$

図5 破断する応力 $(\sigma_a = \sigma_w + 10[\text{MPa}])$ を繰返す場合の表面状態の変化(←軸方向)

図6 破断する応力 ($\sigma_a = \sigma_w + 10$ [MPa]) を繰返す場合のき裂伝ば速度とき裂長さの関係 (a) 孤立材 (初期応力 $\sigma_{a1}=255$ MPa, 応力増分 $\Delta\sigma=5$ MPa, 最終破断応力 $\sigma_f=280$ MPa) (b) 連結材 (初期応力 $\sigma_{a1}=385$ MPa, 応力増分 $\Delta\sigma=10$ MPa, 最終破断応力 $\sigma_f=495$ MPa)

図7 コーキング過程における表面状態の変化 (↔軸方向)

ライト粒界近傍に発生したき裂はその両端をマルテンサイトにより一時成長を阻止され、その後応力の繰返しとともにマルテンサイトをう回しながら一端はフェライト粒内を、他端はフェライト粒界に沿って成長し、再びマルテンサイトに当たって停留している。応力を 5 MPa 増加させた 2 段めの応力繰返しでもき裂はほとんど成長していないが周囲の被害は進行している。さらに、応力を 5 MPa 増加させた 3 段めにおいてき裂は成長を始め、1 段めの過程と同様にマルテンサイトをう回しながら、しかもき裂先端近傍に発生したき裂と合体しながら成長している。この例からわかるように本材料では、き裂両端にき裂がう回しにくい形でマルテンサイトが存在する場合き裂は停留しやすい。このようなき裂の伝ばおよび停留挙動に及ぼすマルテンサイトの影響は、疲労限度におけるき裂の停留条件をマルテンサイトのき裂伝ば抵抗との関係から破壊力学的に検討した国尾らの結果⁽⁹⁾でも指摘されている。

(b) 連結材 この場合の応力増分は 10 MPa である。この例では 1 段めの応力で、フェライト粒内に発生したき裂はマルテンサイトにより成長を阻止さ

れ、いったん成長は止まるがその後の繰返しにより、近くのフェライト粒内で発生したき裂と、マルテンサイトを引きさく形で合体し、そのまま停留している。さらに応力を 10 MPa ずつ増加させた 2 段め、3 段めではほとんど成長していないが、多くのフェライト粒内にすべり帯やき裂の発生が認められ、疲労被害が全体的に進行しているのがわかる。4 段めの応力増加により、き裂の合体が起こり、き裂は長くなるものの合体後はそのままの長さで、5 段めの応力下でも成長しない。6 段めの応力増加で再びき裂の合体が起こりき裂は長くなるが、再び停止し、その後 11 段めまで停留したままで 12 段めの応力増加により破壊に至る。

表 3 に、コーキシング試験の結果を、図 8 に、図 7 の結果も含めたコーキシング過程におけるき裂伝ば曲線をそれぞれ示す。図中の番号は試験片の番号、 $\Delta\sigma$ は応力増分、 σ_n は n 段めの応力、 σ_f は最終破断応力を意味している。表 3、図 8 および前述の結果からわかることを列挙すると次のようになる。

(1) 両材とも応力増分が小さいほどコーキシング効果は大きい。

表 3 コーキシング試験結果(平滑材)

Material	Specimen (Stress increment, $\Delta\sigma$ MPa)	Stress σ_n (MPa)	Number of cycles, N ($\times 10^7$)	Crack length l (mm)	Increment of crack length Δl (mm)	Increment of fatigue limit (%)
D.P. steel A ($\sigma_w=260$ MPa)	3 (5)	255	1	0.110	-	5.8
		260	1	0.110	0	
		265	1	0.282	0.172	
		270	1	0.637	0.355	
		275	1	0.646	0.009	
		280	0.44	Broken	-	
	4 (10)	255	1	0.100	-	5.8
		265	1	0.124	0.024	
		275	0.27	Broken	0.001	
	5 (20)	255	1	0.200	-	0
		275	0.54	Broken	-	
D.P. steel B ($\sigma_w=390$ MPa)	6 (10)	385	1	0.057	-	24.4
		395	1	0.057	0	
		405	1	0.057	0	
		415	1	0.057	0	
		425	1	0.057	0	
		435	1	0.057	0	
		445	1	0.057	0	
		455	1	0.057	0	
		465	1	0.057	0	
		475	1	0.057	0	
	7 (10)	485	1	0.057	0	26.9
		495	1.0	Broken	-	
		385	1	0.028	-	
		395	1	0.028	0	
		405	1	0.028	0	
		415	1	0.028	0	
		425	1	0.028	0	
		435	1	0.047	0.019	
		445	1	0.047	0	
		455	1	0.047	0	
	8 (10)	465	1	0.047	0	24.4
		475	1	0.047	0	
		485	1	0.047	0	
		495	1	0.055	0.008	
		505	0.13	Broken	-	
		385	1	0.022	-	
		395	1	0.022	0	
		405	1	0.022	0	
		415	1	0.052	0.030	
		425	1	0.052	0	
	9 (20)	435	1	0.106	0.054	19.2
		445	1	0.106	0	
		455	1	0.106	0	
		465	1	0.106	0	
		475	1	0.106	0	
		485	1	0.106	0	
		495	0.07	Broken	-	
		385	1	0.033	-	
		405	1	0.033	0	
		425	1	0.033	0	
		445	1	0.033	0	
		465	1	0.033	0	
		485	0.08	Broken	-	

表 4 コーキシング試験結果(小穴材)

Material	Specimen (Stress increment $\Delta\sigma$ MPa)	Stress σ_a (MPa)	Number of cycles $N(\times 10^3)$	Crack length l (mm)	Increment of crack length Δl (mm)	Increment of fatigue limit (%)
Steel A ($\sigma_w=245$ MPa)	10(10)	240	1	0.540	-	6.1
		250	1	0.670	0.13	
		260	1	0.882	0.212	
		270	0.12	Broken	-	
Steel B ($\sigma_w=280$ MPa)	13(10)	275	1	0.605	-	8.9
		285	1	0.625	0.020	
		295	1	0.695	0.070	
		305	1	0.760	0.065	
		315	0.31	Broken	-

(a) 孤立材(Steel A)

(b) 連結材(Steel B)

図 8 コーキシング過程におけるき裂伝ば曲線

(2) 両材のコーキシング効果は, 孤立材で約 5.8% ($\Delta\sigma=5, 10$ MPa), 連結材で約 25% ($\Delta\sigma=10$ MPa) および約 19% ($\Delta\sigma=20$ MPa) であり連結材において特に顕著である。

(3) コーキシング効果が認められる場合, 応力増加によりき裂が伝ばする場合とほとんど伝ばしない場合があるが, 連結材では, 伝ばしない場合がとくに多く, 中には応力増加にもかかわらず最初の応力レベルで発生したき裂が最終応力レベルを負荷する前まで光顕微鏡で観察する限りほとんど伝ばしない場合もある(内部では成長している可能性があるが本実験の範囲では明らかでない)。

3.3 考察 以上のように, 二相鋼において停留

図 9 σ_a/σ_B - N 曲線

き裂が認められる場合には, 孤立材, 連結材のいずれにおいてもき裂はマルテンサイトにより成長を阻止されて停留する。また応力増加後破断する場合の起点はつねに最初の応力でできた停留き裂であり, これらの挙動に相形態の相違による差異はみられない。しかしながら孤立材のコーキシング効果は, 焼なまし材⁽³⁾のそれと同程度であるのに対し, 連結材のそれははるかに大きい。この理由を考察すると以下ようになる。

(1) 初期伝ばにおける顕著な組織依存性 図 9 は, 両材の $S-N$ 曲線の応力振幅を引張強さ σ_B で無次元化して整理したものである。高応力域では, 相対応力をそろえると両材の破断寿命はほぼ等しいのに対し, 疲労限度近傍の応力下では両材の寿命差は大きい。疲労限度近傍における両材の寿命差は, 以下に述べるようなき裂伝ばに対する顕著な組織依存性によるものと考えられる。すなわち孤立材の場合, 最初の応力でできたフェライト数結晶粒程度の寸法を有するき裂はマルテンサイトで伝ばを阻止され停留するが, その後の応力繰返しあるいは応力増加によりマルテンサイトをう回し, 伝ば拡大する。一方, 連結材では最初の応力で発生したき裂はマルテンサイトで成長を阻止されるが, 孤立材の場合のようにマルテンサイトをう回することはできないため, その後の応力繰返しまたは

応力増加によりマルテンサイトを貫通する形で2~数個のき裂が合体し、そのまま停留する。このように、両材ともき裂停留の原因にマルテンサイトによるき裂伝ばの阻止が深く関係しているがき裂の成長経路に相違がみられ、その際の伝ばに対する抵抗は連結材のほうが大きく、成長しにくい。このことを反映して連結材の疲労比 σ_w/σ_B は0.47と孤立材における0.36よりかなり大きい。このことはまたき裂の停留期間にも関係し、連結材におけるき裂の停滞は孤立材より長くなる(図4から明らかなように、1段めの応力繰返しにおけるき裂の停留期間は孤立材より連結材のほうが長い。同様な傾向は各応力段階で認められた)。

一般に酸化物誘起形のき裂閉口の効果は停留期間が長いほど大きい。このことが連結材と孤立材におけるコーキシング効果の差異に関係しているものと考えられる。

(2) コーキシング効果の停留き裂長さ依存性

これまでの研究によると、コーキシング効果による疲労限度の上昇率は微視的停留き裂が短いほど大きいことが明らかにされている⁽⁸⁾。したがって、連結材におけるコーキシング効果が孤立材のそれより大きい理由として連結材の停留き裂長さが孤立材のそれより短い(表3)ことも関係していることが考えられる。そこで、巨視的停留き裂が生じる小穴材による検討を行った。

表4に小穴材におけるコーキシング試験結果を示す。小穴材における両材間の停留き裂長さの差は平滑材におけるそれより小さくなっている。そして連結材でのコーキシング効果は孤立材でのそれより多少大きいものの平滑材における両材の差異よりかなり小さくなっている。

4. 結 論

微視組織形態を変えた2種類のフェライト・マルテンサイト二相鋼(孤立材と連結材)を用いて平滑材および小穴材の回転曲げ疲労試験を行い、き裂停留挙動およびコーキシング効果に及ぼす微視組織の影響を調べた。得られたおもな結論は次のとおりである。

(1) いずれの材料でも、き裂停留の原因としてマルテンサイトによるき裂成長の阻止効果が深く関係している。このことを反映して、停留き裂の先端は表面でみる限りすべてマルテンサイトにつきあたっていた。

(2) 平滑材におけるコーキシング効果は、孤立材より連結材のほうがはるかに大きい。しかしながら、小穴材の場合両材の差異はかなり小さくなる。

(3) いずれの材料でも、破断の起点は最初の応力で発生した微視的停留き裂である。

(4) 最初の応力でできた停留き裂は、応力レベルを上げると伝ばして停留する場合とほとんど伝ばしない場合がある。連結材の場合、後者の傾向が顕著である。

文 献

- (1) 皮籠石・ほか2名, 機論, 57-537, A(1991), 1043.
- (2) 皮籠石・ほか2名, 機論, 57-544, A(1991), 2866.
- (3) 西谷・池永, 機械の研究, 27-8(1975), 17.
- (4) 西谷・山口, 機論, 45-391, A(1979), 260.
- (5) 西谷・ほか2名, 材料, 29-317(1980), 143.
- (6) 続木・ほか3名, 機論, 46-408, A(1980), 439.
- (7) 酒本・ほか3名, 機論, 47-424, A(1981), 1257.
- (8) 西谷・田中, 材料, 31-350(1982), 1107.
- (9) Kunio, T. and Yamada, K., ASTM STP, 675(1979), 342.