

ベイニティックフェライトを母相組織に有する TRIP 鋼板の バーリング・タッピングに及ぼす疲労特性の影響*

長坂明彦^{*1}・中澤貴広^{*2}・守屋俊介^{*3}・村上俊夫^{*4}
北條智彦^{*5}・安部洋平^{*6}

Effect of Fatigue Characteristics on Burring and Tapping in TRIP Sheet Steel with Bainitic Ferrite Matrix

NAGASAKA Akihiko, NAKAZAWA Takahiro, MORIYA shunsuke, MURAKAMI Toshio,
HOJO Tomohiko and ABE Yohei

Effect of fatigue characteristics on burring of 0.2C-1.5Si-1.5Mn (mass%) ultra high strength TRIP-aided sheet steel with bainitic ferrite matrix (TBF steel) was investigated for automotive applications. The combined rotational and downward force of the thermal drilling tool bit created friction heat. The height of the bushing was roughly 3 to 4 times the initial sheet thickness. The bushings are ideal for thread applications, as the strength of threads was significantly increased. We found that the fatigue life of TBF375 steel possessed the highest numbers of cycles to failure compared with TBF450 and TDP steels.

キーワード :TRIP 鋼板, バーリング, タッピング, 疲労特性

1. 緒言

近年, 電気自動車およびハイブリッドカー等の各種メンバー類には優れたプレス成形性を有する超高張力 TRIP 鋼板の適用が期待されている¹⁾³⁾. これまでに, TRIP 鋼板のバーリングに関する研究報告⁴⁾がなされてきたが, TRIP 鋼板のバーリングに及ぼす疲労特性の影響に関する報告は十分に行われていない. そこで本研究では, TRIP 鋼板のバーリングの改善 (ナットレス) を目的として, 母相組織をベイニティックフェライトとした TRIP (TBF) 鋼板⁵⁾のバーリング・タッピングに及ぼす疲労特性の影響を調査した.

2. 実験方法

供試鋼には表 1 に示す化学組成を有する冷延鋼板 (板厚 1.2mm) を用いた. TBF 鋼は, 950℃, 1200s のオーステナイト γ 化後, 375℃または 450℃, 200s のオーステンパ処理を施した. 以後, これらの鋼を TBF375 および TBF450 と呼ぶ¹⁾. ここで, オーステンパ温度には TBF 鋼の M_s 点 (420℃) の前後の温度を採用した.

比較として, 780℃, 1200s の 2 相域焼なまし後, 400℃, 1000s のオーステンパ処理を施し, TRIP 型ポリゴナルフェライト鋼 (TDP 鋼) を作製した. なお, TDP 鋼は Si および Mn 添加量をほぼ一定とし, C 添加量を 0.1~0.4mass% の範囲で変化させた. 以後これらの鋼を TDP1~TDP4 と呼ぶ. また, 残留オーステナイト γ_R を含まないフェライト・マルテンサイト複合組織鋼 (MDP 鋼) も用いた.

表 1 供試鋼の化学組成 (mass%)

steel	C	Si	Mn	P	S	Al
TBF	0.20	1.51	1.51	0.015	0.0011	0.040
TDP1	0.10	1.49	1.50	0.015	0.0012	0.038
TDP2	0.20	1.51	1.51	0.015	0.0011	0.040
TDP3	0.29	1.46	1.50	0.014	0.0012	0.043
TDP4	0.40	1.49	1.50	0.015	0.0012	0.045
MDP	0.14	0.21	1.74	0.013	0.0030	0.037

* 2014 年 3 月 8 日 日本機械学会北陸信越支部第 51 期総会・講演会にて一部発表.

*1 機械工学科教授

*2 長野工業高等専門学校専攻科学生
(平成 25 年度機械工学科卒業)

*3 長野工業高等専門学校専攻科学生
(平成 24 年度機械工学科卒業)

*4 株式会社 神戸製鋼所

*5 岩手大学助教

*6 豊橋技術科学大学准教授

原稿受付 2014 年 5 月 20 日

図1にバーリング・タッピング試験装置を示す。試験機にはMCを使用した。バーリングには板状試験片(150×50mm)を用い、M6 ショート(フロードリルの直径5.3mm)のフロードリルを装着し、切削送り速度 $F=10\text{mm/min}$ 、回転数 $n=3500\text{rpm}$ で行い、Z軸ロードメータ(スラスト相当) S およびスピンドルロードメータ(トルク相当) T の測定を行った。その後、タッピングを行い、必要に応じ疲労試験を行った(応力比 $R=0.1$ (引張り-引張り, 片振り), 周波数10Hz, 正弦波, 最大応力 $\sigma_{\max}=300\sim400\text{MPa}$, 最小応力 $\sigma_{\min}=30\sim40\text{MPa}$)。

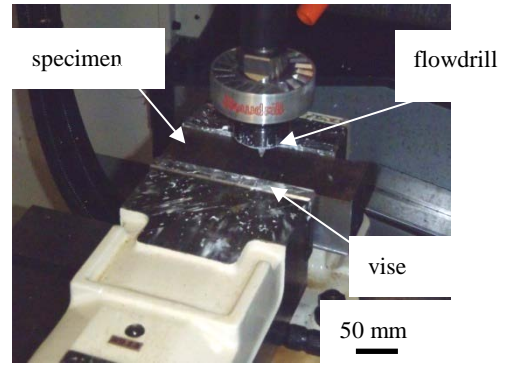


図1 バーリング・タッピング試験機

S-N曲線測定試験には図2に示す試験片を用いた。汎用型疲労試験機(容量100kN)を用い、荷重制御方式で、周波数10Hzの正弦波、応力比 $R=0.1$ (引張り-引張り, 片振り)の条件で行った。また、疲労限は繰返し数 $N_f=1\times10^6\text{cycle}$ で破断しない応力振幅範囲($\sigma_R=\sigma_{\max}-\sigma_{\min}$)の最大値とした。

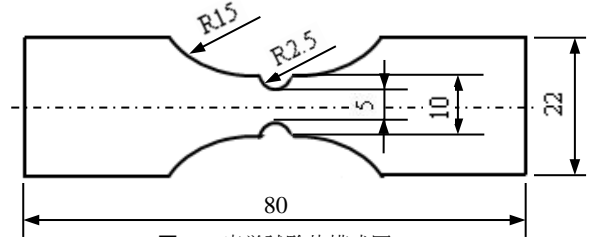


図2 疲労試験片模式図

3. 結果および考察

図3にTBF鋼の組織写真を示す。図3(a)はTBF375の組織、図3(b)はTBF450の組織である。レペラ腐食により、白い部分が γ_R あるいはマルテンサイト α_m 、グレーの部分がベイニティックフェライト α_{bf} を示す。また、熱処理後の供試鋼の第2相および γ_R 特性と引張特性を表2に示す。TBF鋼の M_s 点(420℃)以下の375℃でオーステンパ処理を施したTBF375の組織は、主に α_{bf} と γ_R からなり、 γ_R の大半はフィルム状に存在する²⁾。一方、450℃でオーステンパ処理を施したTBF450では同様に α_{bf} を母相とし、第2相として γ_R の他に8.1 vol%の α_m が存在する(表2)。

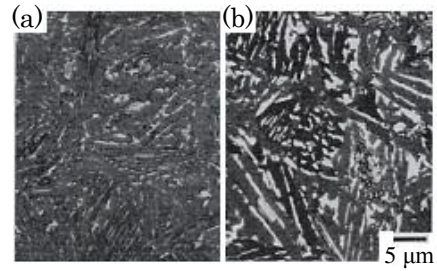


図3 TBF鋼の組織写

(a) TBF375, (b) TBF450

(白: γ_R あるいは α_m , グレー: α_{bf})表2 供試鋼の第2相および γ_R 特性と引張特性

steel	T_A (℃)	f (vol%)	f_{am} (vol%)	$f_{\gamma 0}$ (vol%)	$C_{\gamma 0}$ (mass%)	YS (MPa)	TS (MPa)	TEI (%)	FL (MPa)	FL/TS
TBF375	375	8.9	0	8.9	1.16	971	1154	7.8	465	0.403
TBF450	450	19.3	8.1	11.2	0.96	617	918	18.2	420	0.458
TDP1	400	19.9	0	4.9	1.31	429	651	37.2	-	-
TDP2	400	35.3	0	9	1.38	526	825	36	340	0.412
TDP3	400	44.1	0	13.2	1.41	562	895	32.2	-	-
TDP4	400	55.1	0	17	1.45	728	1103	32.8	-	-
MDP	-	27.1	27.1	-	-	593	783	13.1	-	-

T_A : austempering temperature, $f, f_{am}, f_{\gamma 0}$: volume fraction of second phase, volume fraction of martensite, initial volume fraction of retained austenite, $C_{\gamma 0}$: initial carbon concentration in retained austenite, YS: yield stress, TS: tensile strength, TEI: total elongation and FL: fatigue limit.

このとき、TBF375 と比べ、TBF450 の γ_R の初期体積率 $f_{\gamma 0}$ は増加する²⁾。また、引張強さ TS は TBF450 と比べ、TBF375 では 1100MPa 以上と高くなる。

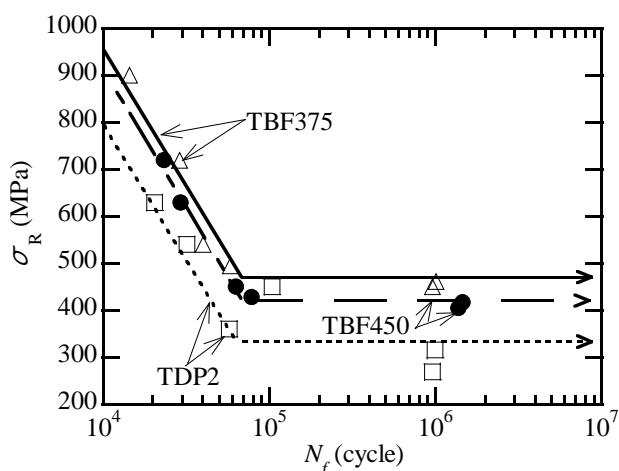


図4 TBF 鋼および TDP2 鋼の S-N 曲線

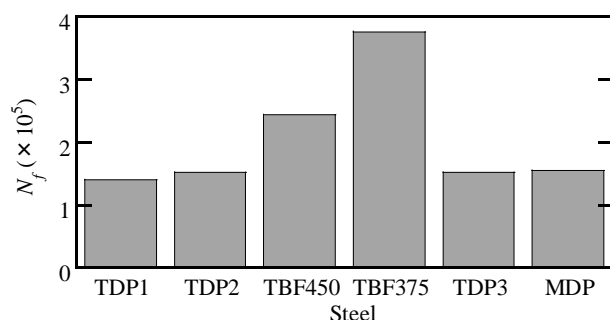


図5 タッピング後の各供試鋼の破断繰返し数 N_f ($\sigma_{\max}=400$ MPa)

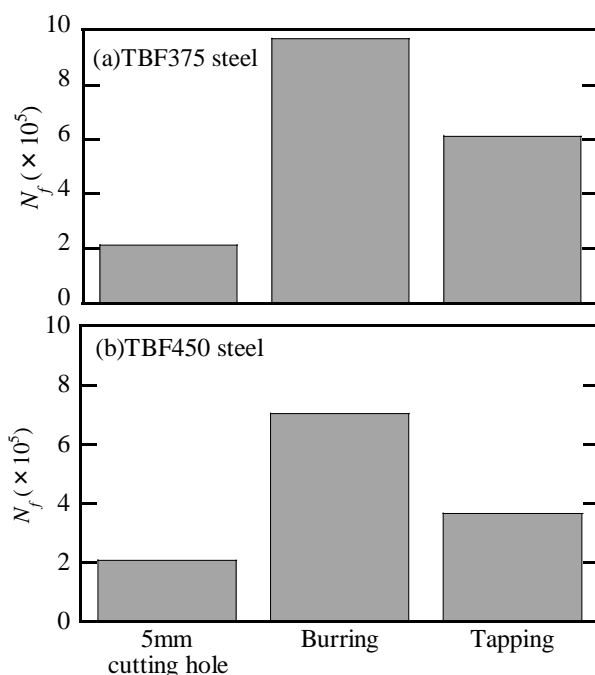


図6 加工の異なる TBF375 鋼および TBF450 鋼の破断繰返し数 N_f の関係 ($\sigma_{\max}=300$ MPa)

図4にTBF鋼およびTDP2鋼のS-N曲線を示す。引張強さ TS の増加に伴い、疲労限 FL も相対的に高い値を示す。これは、合金元素だけでなくマイクロ組織の影響により引張強さ TS および疲労限 FL が上昇することを示す。引張強さ TS に対する疲労限 FL の比 FL/TS は TBF450, TDP2, TBF375 鋼の順に高い値を示した(表1)。

図5に最大応力 $\sigma_{\max}=400$ MPaでのタッピング後の各供試鋼の破断繰返し数 N_f を示す。なお、TDP4鋼はタッピングが不可能であったため除外した。TBF375鋼は、TBF450鋼およびTDP2鋼と比べ高い疲労寿命を示した。TDP1~3鋼およびMDP鋼において、 N_f は 1.5×10^5 回程度であり、大差がないといえる。これは、ポリゴナルフェライトを母相に有するTDP鋼において、C添加量の増加に伴う TS 上昇は、タッピング後の疲労寿命に効果を示さなかったことを示唆する。

図6に最大応力 $\sigma_{\max}=300$ MPaでの加工の異なるTBF375鋼およびTBF450鋼の破断繰返し数 N_f の関係を示す。ドリル切削、タッピングおよびバーリングの順にき裂の発生が遅れることを示した。これは、バーリングによって生じる加工変質層が寄与し、さらにタッピングによりバーリング時に生じた加工変質層が適度に除去されたこと、予き裂の発生が一因であると考えられる。ドリル切削ではTBF375鋼とTBF450鋼のどちらも大差は見られなかったが、バーリングおよびタッピングにおいて、TBF375鋼はTBF450鋼よりも1.5倍程度高い疲労寿命を示した。

また、バーリングおよびタッピングを施すことで、疲労寿命は各供試鋼の疲労限よりも低くなるが、TBF375およびTBF450鋼の疲労寿命はS-N曲線よりも高寿命側へシフトする傾向を示した。

4. 結言

母相組織をベイニティックフェライトとしたTRIP鋼板のバーリング・タッピングに及ぼす疲労特性の影響を調査した。主な結果は以下の通りである。

- (1) 疲労限は、TBF375, TBF450, TDP2鋼の順に高い値を示した。引張強さに対する疲労限の比 FL/TS は、TBF450鋼が最も高くなり、多量かつ安定な γ_R によってもたらされたと考えられた。
- (2) タッピング後のTBF375鋼は、TBF450鋼およびTDP2鋼と比べ高い疲労寿命を示した。TBF鋼のバーリングは、疲労き裂の発生を抑制した。これは、穴近傍にバーリングによって生じる加工変質層が寄与したためだと考えられた。

(3) パーリングおよびタッピング後の TBF 鋼の疲労寿命は、疲労限よりも低くなるが、高寿命側へシフトする傾向を示した。

最後に、本研究に際しご支援をいただきました公益財団法人 天田財団ならびに豊橋技術科学大学にお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) K. Sugimoto, A. Nagasaka, M. Kobayashi and S. Hashimoto: ISIJ Int., **39** (1999), 56.
- 2) K. Sugimoto, S. Song, J. Sakaguchi, A. Nagasaka, and T. Kashima: Tetsu-toHagane, **91** (2005), 278.
- 3) K. Sugimoto, A. Kanda, R. Kikuchi, S. Hashimoto, T. Kashima and S. Ikeda: ISIJ Int., **42** (2002), 910.
- 4) A. Nagasaka, S. Hasebe, T. Matsushima, K. Sugimoto and T. Murakami: J. of Iron and Steel Research, Int., **18** (2011), 442.
- 5) A. Nagasaka, Y. Kubota, K. Sugimoto, A. Mio, T. Hojo, K. Makii, M. Kawajiri and M. Kitayama: ISIJ Int., **50** (2010), 1441.
- 6) 西山善次: マルテンサイト変態, 丸善株式会社, (1979), 13.