合理的溶接施工に寄与する微細オース フォームベイナイト型 570 MPa 級 厚板シリーズの開発

藤原 知哉^{*1)} 中村 浩史^{*2)} 岡口 秀治^{*3)}
川畑 友弥^{*4)} 永吉 明彦^{*5)}

1. 緒 言

大型溶接構造物に広く用いられる厚鋼板では、溶接施工の容易さが重要視される。施工性の優れた厚鋼板は工期短縮や建設コスト低減に寄与するため、昨今の経済情勢を鑑みる上でも切望されている。中でも、溶接後の低温割れを防止する予熱処理は、溶接部硬化能の強い高強度鋼を使用する際の必須プロセスであり、鋼板の高強度化が望まれる反面、予熱実施による施工性の大幅低下は避けられなかった。引張強さが 570 MPa 級の厚鋼板はその適用分野が急速に拡大され、490 MPa 級鋼板に代わる次世代汎用型鋼板であるにも関わらず、高靱性材や厚肉材(最大厚 100 mm)での予熱省略は実現されていなかった。これは従来の焼入焼戻による製造法では組織が粗大ベイナイトとなる上に、予熱省略を目指して低 C 化すると、ベイニティック α 間での θ 析出が抑制され、脆化組織である M-A(島状マルテンサイト)が形成されるからである。逆に、高靱性を得る為に θ 析出を促進すべく高 C 化すると予熱温度が高くなるという問題があった。そこで本開発では、ベイナイト組織の高靱性手段としてオースフォームドベイナイトを活用した。これにより組織微細化と低 C 成分での θ 析出促進(M-A の抑制)さらには厚肉材にも対応する高強度化が可能となり、水圧鉄管、タンク、橋梁など各分野に最適な予熱省略型 570 MPa 級厚鋼板を世界で初めてシリーズ化することができた。

2. 開 発 指 針

(1) ベイナイト組織の微細化

本開発は、ベイナイトが剪断変態としての要素を有している⁽¹⁾点に着目した。制御圧延による塊状 α (拡散変態)の微細化は周知の技術であるが、本開発では、0.08C(鋼 1)および 0.18C(鋼 2)の Nb-Ti-B 鋼に対し熱間加工再現試験装置を用いて基礎検討を行い、ベイナイト独自の微細化挙動を明確化し、予熱省略型 570 MPa 級鋼の開発へと結びつけた。鋼 1 を 1100°C で γ 化後、900°C で歪速度 1 s^{-1} で種々の加工を施し、575°C で等温変態させた組織を図 1 に示す。無加工材では長く直線的なラス状ベイニティック α が生成し、典型的な BI 型上部ベイナイト⁽²⁾となった。平行に生成した各ベイニティック α の結晶方位は同じで脆性破壊時の破面単位に相当する大きなベイナイトパケットを形成している。30% 加工材ではベイニティック α は湾曲したが微細化する傾向は示さなかった⁽³⁾。ところが 50% 以上の強加工材ではベイニティック α が微細化すると同時に、大きなベイナイトパケットが存在しなくなった。これは図 2 に示すように隣接するベイニティック α のうち同じ方位を有するものが著しく減少したからである。ベイニティック α 長さとの加工量の関係を図 3 に示す。同一成分での塊状 α の粒径が加工量増加

図 1 強加工によるベイニティック α の微細化。

* 住友金属工業株式会社

総合技術研究所材料研究部：1)副主任研究員 2)担当員
3)主任研究員

鹿島製鉄所厚板生産技術部：4)担当員 5)次長

Development of the 570 MPa-class Plate Series of Fine Ausformed-bainite for Efficient Welding; Kazuki Fujiwara, Hirohumi Nakamura, Shuji Okaguchi, Tomoya Kawabata, Akihiko Nagayoshi(Sumitomo Metal Ind. Ltd.)

1999年

図2 強加工材での隣接ベイニティックαの方位分布.

図3 ベイニティックα/塊状αの大きさと加工の関係.

とともに単調に減少するのに対し、ベイニティックαの長さは軽加工ではほとんど変化せず、強加工で著しく微細化し塊状αよりも一層微細化することがわかった。

(2) 微細化メカニズム

強加工を与えるとベイニティックαが著しく微細化する現象は、転位下部組織(サブグレイン)の形成で説明できると考えた。強加工で形成されるサブグレインは独立した結晶粒に近い性質を持つとされており⁽⁴⁾、ベイニティックαの微細化に対し次のような機構を仮定した。加工量が小さい場合にはセル状組織を形成する転位の密度が小さくセル間の方位差も小さいのでγ粒界で生成したベイナイトはこれらを越えて成長し、湾曲しながら長く成長する。しかし強加工ではサブグレインが形成され、方位差が拡大しベイニティックαはもはやサブグレイン境界を越えて成長することができず成長が抑制されると同時に、発達したサブグレイン境界が新たな核生成サイトとして機能して異なる方位の隣接ベイニティックαを生成させると考えられる。事実、サブグレイン径の計算値⁽⁵⁾と実測したベイニティックαの長さは極めて良く一致し(図4)、さらに強加工を受けたγから変態したベイナイト組織ではベイニティックα同士の界面にサブグレインの痕跡と思われる転位網が存在しているのが観察された⁽³⁾。

(3) θ析出の促進

鋼2を加工せず500°Cで変態させた場合、ベイニティック

図4 ベイニティックαとサブグレインの大きさの一致.

図5 強加工によるθ析出促進とM-Aの消滅.

α間の未変態γ部にCが濃縮しM-Aが形成される。長時間保持により未変態γからθが析出するがそれは1μmを越える粗大な針状のものであった⁽⁶⁾。これに対し900°Cで50%加工を行った場合には、変態初期からθがベイニティックαの内部に析出し、ベイニティックα同士が密接してM-Aが形成されなかった(図5)。このθはsingle variantである⁽⁶⁾ことから、加工γ中の転位によってベイニティックα/γ界面でθ核生成が促進され、未変態γへのC濃縮がなされなかったものと考えられる。

3. 開発鋼の諸特性

(1) 水圧鉄管用 SM570TMC 鋼板

水圧鉄管分野では優れたアレスト性が要求されると同時に、溶接は湿潤な地下坑道で行われるため、他の分野と比較して溶接時の水素侵入量が多く、予熱省略を達成するには一層の低 P_{cm} 化(低C化)が必要であった(表1)。図6に示すように開発鋼は微細なオースフォームドベイナイト組織となり、A種温度：-69°Cという優れたアレスト性(図7)を達成した。

(2) タンク用 SPV490TMC(相当)鋼板

タンクでは溶接による残留応力を除去する為、600°C以上

表1 開発鋼の化学成分 (mass%).

用途	板厚	C	Si	Mn	Others	P_{cm}
水圧鉄管	40 mm	.06	.19	1.37	Cu, Ni, Mo, Nb, Ti	.17
タンク	45 mm	.09	.32	1.50	Mo, Nb, V, Ti	.19
橋梁 1	45 mm	.08	.16	1.36	Cr, Nb, Ti, B	.18
橋梁 2	100 mm	.08	.20	1.46	Cr, Mo, Nb, Ti	.19
耐候性	100 mm	.07	.20	1.00	Cu, Ni, Cr, Ti, Nb	.19
従来鋼	40 mm	.13	.30	1.37	Mo, V	.24

従来鋼の必要予熱温度は75°C, 開発鋼は全て予熱不要.

図6 従来鋼と開発鋼(水圧鉄管用)の金属組織の比較.

図7 開発鋼(水圧鉄管用)の優れたアレスト性.

で後熱処理が行われる. 従って同分野では耐応力腐食割れ (SCC) 性以外に, 後熱処理後も強度が確保される必要がある. 成分を表1に示すように後熱処理で Mo_2C , VN, VC による析出強化を図り, 後熱処理後も十分な強度を満した (表2). さらに小入熱 CO_2 溶接継手での4点曲げアンモニア SCC 試験の結果, 従来鋼の限界応力が $0.75 \sigma_y$ (降伏応力の0.75倍)であったのに対し, 開発鋼では $1.0 \sigma_y$ となり耐 SCC 性が向上した. これは SCC が硬化組織の顕在により助長されることから低 P_{cm} (低 C) によって開発鋼の熱影響部の硬度が著しく抑制された為である.

(3) 橋梁用 SM570TMC 鋼板

橋梁分野での要求は, 最大 100 mm までの極厚鋼板と大入熱溶接時の靱性確保そして耐候性である. 本開発では一般鋼, 耐候性鋼ともに 100 mm 厚まで予熱処理なしでの溶接を可能にした. また表3に示すように, 20 kJ/mm という大

表2 タンク用鋼の特性(後熱処理の影響).

後熱処理 (600°C)	母 材		溶接部(SAW, 5 kJ/mm)		
	YS (MPa)	TS (MPa)	vE-40 (J)	TS (MPa)	vE0 (J)
なし	515	645	248	658	203
あり	536	642	216	667	256

引張試験: JIS 4号(1/4 t, C方向)

JIS 1号

衝撃試験: JIS 4号(1/4 t, L方向)

JIS 4号(1/4 t)

表3 橋梁用鋼の溶接部特性.

鋼種	入熱 (kJ/mm)	溶接法	TS (MPa)	vE-5(FL) (J)
橋梁 1	20.0	EGW	643	115
橋梁 2	10.0	SAW	650	195

溶接継手は35 mm(橋梁 1), 45 mm(橋梁 2)に減厚して試験

引張試験: JIS 1号, 衝撃試験: JIS 4号(1/4 t)

入熱溶接においても十分な靱性を確保しており, 予熱省略のみならず溶接回数の低減による低コスト化と工期短縮にも寄与している.

4. 総 括

ベイナイトが剪断変態の要素を有することに着目し, オースフォームドベイナイト固有の微細化機構と θ 析出促進挙動を明確にした. これにより予熱省略型 570 MPa 級厚鋼板を世界で初めてシリーズ化し98年10月より量産を開始した. これらの鋼板は国内外で使用され溶接構造物の工期短縮とコスト低減に貢献している. 適用分野はさらに拡大されつつあり, 次世代汎用型高張力鋼板として大いに期待される.

5. 特 許

開発鋼に関わる特許は2件の登録特許⁽⁷⁾の他, 現在10件出願中⁽⁸⁾である.

文 献

- (1) Y. Ohmori and T. Maki: Mat. Trans., JIM, **32**(1991), 631.
- (2) Y. Ohmori, H. Ohtani and T. Kunitake: Trans. ISIJ, **11**(1971), 250.
- (3) K. Fujiwara, S. Okaguchi and H. Ohtani: ISIJ Int., **35**(1995), 1006.
- (4) H. J. McQueen: Metall. Trans., **8A**(1977), 807.
- (5) W. Roberts and B. Ahlstrom: Acta Metall., **26**(1978), 801.
- (6) K. Fujiwara and S. Okaguchi: Proc. of Int. Symp. on Solid to Solid Phase Transformation of Metals, The Japan Institute of Metals, (1999), 1517.
- (7) 特許第2776174号「高張力・高靱性微細ベイナイト鋼の製造法」他.
- (8) 特開平8-13031号「靱性と耐溶接割れ性に優れた鋼板の製造法」他.