

ことが予想される。

V. TMCP の特殊鋼および高炭素鋼への適用

座長 川崎製鉄(株)鉄鋼研究所

志賀 千晃

副座長 (株)神戸製鋼所鉄鋼技術研究所

勝亦 正昭

熱間工程で厚板, ホット, 形鋼, 棒鋼線材等が製造されているが, それぞれの工程の目的は所定の形状に成形することであり, 材質特性は焼入れ-焼もどし (Q-T), 焼ならし (N-T) 等の熱処理工程で行われてきた。TMCP (Thermomechanical Control Process) と称する技術はこれらの熱処理工程を省略するものであって, 熱間圧延工程中に加熱, 圧延, 冷却を制御し材質をつくり込むことを目的としている。この技術は厚板の Microalloy 鋼を主体に発展してきたものであり, 単なる省工程化にとどまらず高張力化・高靱性化を実現したことが TMCP 鋼の普及に結びついている。今回はこれらの Microalloy 鋼を除く, 中・高合金鋼および高炭素鋼を対象とした TMCP 技術の討論会であった。応募件数は 18 件であったが 15 件に絞らせていただいた。1 日の討論会となったが, 総合討論時間が少なかったことを反省している。

焼ならしおよび再加熱焼入れ処理の省略はこれまでに着手されているが, 溶体化熱処理及び軟化処理の省略が新しい。TMCP 化しての材質上の利点としてクリープ強度の上昇, 焼もどし軟化抵抗の上昇, 耐食性の向上, 軟化がこれまでにない着眼点である。これらの材質上の利点は鋼のマイクロ組織の制御によって得られるが, Nb, Cr 析出物及びセメンタイトの粒内析出, パーライト・ラメラ間隔の調整等の析出物を好ましい大きさの析出サイトに制御する技術が述べられたところに本討論会テーマの特徴がある。討論された論文の内容をマイクロ組織, 材質, 鋼種, 省工程の観点から分類すると Table 1, 2 のようになる。発表の論旨を以下に示す。

(討39) 中高温圧力容器用 Cr-Mo 鋼への TMCP の適用

(新日本製鉄(株)名古屋技術研究部 土田 豊ほか)

従来 N-T 工程によって製造されていた 3% Cr-1Mo-

Table 2. TMCP による省工程

1.	焼ならし熱処理の省略
2.	再加熱焼入れ熱処理の省略
3.	溶体化熱処理の省略
4.	球状化焼鈍の時間短縮あるいは省略

1/4V-Nb 鋼を, DQ により省工程化とともにクリープ強度と靱性を同時に向上させている。N-T 工程では焼ならし温度を上げると Nb が固溶してクリープ強度が上昇するが, γ 粒が粗大化し靱性が劣化する欠点があった。

DQT 工程ではスラブ加熱温度を Nb が固溶する温度まで上げて γ 粒が粗大化しても, 低温圧延を行うことにより組織が微細化されて, 靱性も向上する。Nb 析出物, $M_{23}C_6$ 等の析出物の制御によってクリープ強度の上昇をさせたところに意義がある。その結果 482°C での設計応力を従来鋼よりも 40% 以上高くすることができる。

(討40) TMCP 適用による改良 9Cr-1Mo 鋼の機械的性質の改善

(川崎製鉄(株)鉄鋼研究所 松崎明博ほか)

高温プラント用構造用鋼として優れた特性を有する改良 9Cr-1Mo 鋼は従来 N-T 工程によって製造されていたが, CR 工程により省工程化するとともに, クリープ強度の上昇, 焼もどし軟化抵抗の上昇を通じて溶接後の応力除去焼鈍時の強度低下抑制を図ることができ, そのための製造因子をまとめた。N-T 工程では焼ならし温度を高めると Nb が固溶しクリープ強度が上昇するが, γ 粒が粗大化するため靱性が低下する。CR 工程では高温加熱により Nb の固溶を促進させても 1000°C 以上の再結晶域圧延により細粒化できる。

また 900~1000°C の高温未再結晶域での圧延による歪みの導入によりその後の焼もどし時に Nb の炭窒化物, $M_{23}C_6$ 等の析出物が粒内に微細に析出することが焼もどし軟化抵抗の上昇につながる。低温圧延にも限界があり 900°C 以下の低温未再結晶 γ 域圧延はクリープ強度, 引張強さを低下させるおそれがある。

(討41) オーステナイトステンレス鋼における加工熱処理による高強度化の検討

(NKK 鉄鋼研究所 山本定弘ほか)

SUS304 や 304L は従来圧延後溶体処理が行われるが

Table 1. TMCP による組織上の制御因子と材質上の利点

マイクロ組織上の制御因子	材質上の利点	鋼種 (形状)
1. 析出物制御 (1) Nb の微細析出 (2) Nb の粒内微細析出 (3) $Cr_{23}C_6$ の析出抑制 $Cr_{23}C_6$ の粒内析出 (4) 初析セメンタイト制御 粒界析出の抑制, 点状析出 (5) パーライトラメラの間隔	クリープ強度の上昇 焼もどし軟化抵抗の上昇 耐食性の向上 耐食性の向上 靱性の向上 軟化 軟化	3Cr-1Mo (厚板) 9Cr-1Mo (厚板) SUS304L (厚板) 42Ni22Cr (厚板) 過共析鋼 (棒)
2. 変態生成物の制御 (1) 細粒化...マルテンサイト, ベイナイト, フェライト ...オーステナイト ...パーライトコロニー (2) フェライト・パーライト体積率の増大	靱性の向上 高強度化 高強度・高延性 軟化 (加工性) 高強度化	中炭素鋼 (線・棒) 3Cr-1Mo, 低温用棒鋼 高 Mn 非磁性鋼 SK (ホット) 中炭素鋼 (線・棒) SUS304 (厚板)
3. 加工転位の導入		

CR 後加速冷却を行うことによって省工程化ができる。材質面でも従来と同等の耐食性を有するばかりか未再結晶温度域まで圧延仕上温度を下げることににより高強度化が可能となる。高強度化の度合いは未再結晶域での圧下率により決まりそれはサブストラクチャー強化に起因する。圧延後の加速冷却速度は Cr 炭化物の析出を抑制するがこの臨界冷却速度は C 含有量が低くなるにつれて遅くなる。

(討42) 極低温用 22Mn-13Cr-5Ni 系非磁性鋼板の強化に及ぼす加工熱処理の影響

((株)神戸製鋼所加古川製鉄所 池田惣一ほか)

高強度高 Mn 非磁性鋼板は溶体化処理が必要であったが、DQ 化することにより省工程化が可能である。材質面でも 900°C 以上の圧延により再結晶化し細粒効果を得られ、高強度化が図れる。これらの細かい再結晶粒を得るには圧延後の冷却速度および圧延から冷却開始までの時間の最適化が必要である。板厚 70 mm の TMCP 鋼は溶体化処理材に比し -269°C の 0.2% 耐力、引張強さで約 100 MPa 上昇する。

(討43) 高 Ni 合金クラッド鋼板の鋭敏化特性に及ぼす制御圧延の影響

(NKK 鉄鋼研究所 片平正宏ほか)

高 Ni 合金クラッド鋼を制御圧延・加速冷却することにより溶体化処理工程の省略とともに高温時効後の鋭敏化特性が向上する。これは制御圧延の熱間加工歪みが炭化物の粒内析出を促進することによる。この耐食性の向上効果は 950°C×1h の安定化熱処理を受けても変わらない。良好な耐食性を得るには 50% 以上の圧下率の制御圧延が必要であり、また C 含有量も耐食性に大きく影響し、0.01% 以下の C では良好な耐粒界腐蝕性を示す。

(討44) 高炭素熱延鋼板の材質に及ぼす熱延冷却条件の影響

(新日本製鉄(株)八幡技術研究部 末広正芳ほか)

SK-5 高炭素熱延鋼板のランアウトテーブル上の冷却速度を大きくすると強度および全伸びバランス、曲げ性が向上し、かつ冷却時の耳割れが発生しにくくなる。これは冷却速度の増大にともなうパーライト・コロニー及びパーライト・ラメラ間隔が小さくなることによる。また高冷却速度の実施により普通鋼並みの高生産性が得られることになる。

(討45) 制御圧延・制御冷却による中炭素鋼のフェライト・パーライト組織微細化とその後の球状化挙動との関係

((株)神戸製鋼所鉄鋼技術研究所 金築 裕ほか)

中炭素鋼の球状化焼なまし処理を簡略化するための圧延組織と制御圧延・制御冷却条件との関係が調査された。制御圧延(850°C-10 s⁻¹)・制御冷却(10°C/s)によりフェライト変態直前のオーステナイト結晶粒径を 10 μm の超微細粒とし、変態後の初析フェライト体積率 (V_f) を平衡状態にできるだけ近づけることにより、球状化焼なまし処理簡略化可能な組織を得ることができると報告している。

V_f の増加はパーライト中の炭素濃度を増加させるので、球状化焼なまし処理の α - γ 2 相域加熱中にオーステナイト中に微小セメンタイトを残存させるのに有効に作用し、その後の徐冷中での再生パーライトの出現を防止するためと考えている。

(討46) TMCP による機械構造用棒鋼の軟質化

(新日本製鉄(株)室蘭技術研究部 内藤賢一郎ほか)

機械構造用低合金 Cr-Cr-Mo 鋼の冷間鍛造前の軟化処理を省略化するために、制御圧延と徐冷を利用した製造技術を開発した。すなわち、圧延仕上温度を 850°C 以下とし、冷却床に設置した徐冷カバーにより 0.4 (SCM440), 0.6 (SCM420), 0.3 (SCr420)°C/s 以下の冷却速度で冷却することにより、フェライト-パーライト変態を促進し、ベイナイトなどを含まない軟質の組織とした。一方 0.03~0.55% C の SC 系中炭素鋼の Si, Mn 量を低減し、代わりに Cr, B の添加を行い、これに低温圧延を行うことにより、圧延ままで球状化焼なまし材と同等の強度レベルまで軟化できると報告した。これは固溶強化元素の低減効果のほかに初析フェライト分率の大幅な増加によるものである。

(討47) TMCP による直接軟化軸受鋼の開発

(川崎製鉄(株)鉄鋼研究所 田畑純久ほか)

高炭素 Cr 軸受鋼は圧延ままで硬さが高いため、その後の鋸断または冷間加工工程に先立ち軟化焼なましを施されるが、低温加熱、低温圧延することにより通常圧延材に比べ硬さが低下することを報告した。これはパーライト変態が促進されたため、ラメラ間隔が粗くなったためである。また、制御圧延により初析セメンタイトの微細分散も生じており、球状化焼なまし処理後の組織及び機械的性質も向上することを示した。SUJ2 130 mm 丸棒に本法を適用した結果、通常圧延材の 3 倍の速度で鋸断でき、これは軟化焼なまし処理材に近い水準であった。

(討48) 熱間圧延線材の軟質化に関するメタラジーと製造条件

(新日本製鉄(株)釜石技術研究室 樽井敏三ほか)

中炭素鋼の Mn を Cr で置き換え、さらに、B を添加した成分系を圧延後徐冷処理することによって、球状化焼なまし材と同等の特性を有する軟質線材を開発した。Mn を Cr で置き換えたのはフェライト-パーライト変態を高温で短時間に終了させるためである。B 添加もフェライト-パーライト変態を促進するが、これは Fe₂₃(CB)₆ が α/γ 界面に析出し、 α/γ あるいは θ/γ 界面における炭素濃度の変化が生じ、これによるフェライトとパーライトの成長速度の増加が起こったと考えている。

0.46C-0.06Si-0.34Mn-0.28Cr-0.002B-0.024Ti 鋼を熱間圧延後緩速冷却することにより、球状化焼なまし処理を省略しても冷間鍛造可能な 7 T ボルト用鋼を試作した。

(討49) TMCP による棒鋼・線材の高付加価値化とコストダウン

(住友金属工業(株)小倉製鉄所 中里福和ほか)

最近開発された TMCP 棒鋼・線材として、直接軟化型線材、焼入れ省略型線材、低温用鉄筋が紹介された。

0.1% Ti を含むアーク溶接用芯線の圧延組織は通常ベイナイトであるが、低温加熱により焼入性を低下させることにより、フェライト-パーライト組織とし、伸線前の軟化処理を省略可能とした。焼入れ省略型線材と低炭素系 MnMoNb 鋼を制御圧延し、微細なアシキュラーフェライト組織とすることにより、従来の中炭素鋼の製造工程から伸線前の焼ならし及び冷鍛後の焼入れと曲がり強制工程を省略した。低温用鉄筋は低炭素系 MnMoNb 鋼を制御圧延・制御冷却し、微細マルテンサイト-ベイナイト組織したもので、高 Ni 鋼と遜色のない低温靱性を有する。

(討50) 制御圧延・制御冷却による棒鋼の圧延

((株)神戸製鋼所神戸製鉄所 大城毅彦ほか)

棒鋼工場の制御圧延・制御冷却設備の概要と棒鋼製品への適用結果が報告された。

設備の特徴は、中間圧延機及び仕上圧延機の後方に冷却帯が設置されており、制御圧延・制御冷却ができることである。

棒鋼製品への制御圧延・制御冷却技術の適用例として、焼ならし処理の省略を目的として中間水冷を行って圧延仕上温度を 800°C 以下とした微細フェライト-パーライト組織鋼と焼入れ省略を目的として仕上圧延後強冷却を行った直後焼入鋼の特性が報告された。

(討51) 1.0% C-1.5% Cr 鋼の組織におよぼす TMCP の影響

(NKK 鉄鋼研究所 鈴木伸一ほか)

過共析鋼においては、熱間圧延や焼ならし後の空冷時に初析セメントイトが生成し、破壊特性や転動疲労特性に悪影響を及ぼすため、熱処理により初析セメントイトの軽減が図られている。TMCP による SUJ2 の初析セメントイトの形態制御の検討を行った。オーステナイト

を細粒に保つため、初析セメントイトを完全に固溶させることができる下限温度である 950°C に加熱し、圧延することにより、変態前のオーステナイト粒を微細化させることができる。また、800~700°C を加速冷却することにより初析セメントイトの析出・成長を抑制できる。

(討52) 直接焼入れ-自己焼もどしによる太径強靱棒鋼の製造

(トアスチール(株)仙台製造所 江口豊明ほか)

棒鋼工場の概要と直接焼入れ-自己焼もどしによる太径強靱棒鋼の製造結果が報告された。

棒鋼ミルには粗圧延機列中間圧延機列、仕上圧延機列それぞれの後面に浸漬水冷管よりなる冷却帯を有しており、制御圧延・制御冷却が可能となっている。

直径 70~100 mm の S45C 及び SMn443 を用いて圧延後、直接焼入れし約 20 s 冷却し、中心部の温度を約 500°C とした後、空冷することにより通常の焼入れ-焼もどし材と同等の強度、延性、靱性、疲労強度が得られた。

(討53) 制御圧延した棒鋼の靱性におよぼす組織と集合組織の影響

(住友金属工業(株)鉄鋼研究所 前原泰裕ほか)

棒鋼の制御圧延によって形成される集合組織と圧延条件との関係を調べ、機械的性質との関連について検討した。棒鋼の制御圧延によって形成される集合組織は鋼板とは異なる特異な方位で、その主方位は $\{100\} \langle 001 \rangle$ 、副方位は $\{111\} \sim \{211\} \langle 011 \rangle$ であった。制御圧延による靱性向上にはセパレーションの発生が深く関係しており、セパレーションの発生には $\{100\}$ 集合組織の発達が必要である。棒鋼のセパレーションの発生は、鋼板と異なり、圧延方向と垂直な面でのクラックの伝播は $\{111\} \sim \{211\} \langle 011 \rangle$ 副方位が発達すると阻止され、圧延方向と平衡な面でのクラックの伝播が優先的となるためと考えている。