

優れた強度延性バランスを持つ 0.15C-2Si-7%Mn 鋼の $\gamma \rightarrow \alpha$ 加工誘起変態挙動のその場 X 線観察

In-situ Analysis on $\gamma \rightarrow \alpha$ Strain Induced Transformation Behavior of 0.15C-2Si-7Mn Ferrite+Austenite Steel with Excellent Strength - Ductility Balance

鳥塚 史郎, 伊東 篤志
Shiro Torizuka, Atsushi Ito

兵庫県立大学大学院
The Graduate School of Engineering, University of Hyogo

0.1C-2Si-5%Mn 鋼は優れた強度・延性バランスを持つが、今回 C 添加量を 0.15%、Mn 添加量を 7%まで増加し、超微細フェライト-オーステナイト組織を形成した。この鋼に対し、引張試験その場透過 X 線回折を行い、加工硬化能の C 添加量依存性、Mn 添加量依存性の検討を行った。

キーワード： フレッシュマルテンサイト、残留オーステナイト、超微細組織、引張試験、その場透過 X 線回折、強度、延性、加工誘起変態

背景と研究目的：

構造用金属材料の国際競争力は、その国の産業全体の競争力を左右するといっても過言ではない。強い素材産業があるからこそ、強い自動車産業があり、航空機産業、機械産業がある。特に自動車用ハイテン(高強度鋼板)は、自動車産業の競争力の根幹をなす技術である。しかし、高強度であり、伸びも大きく、靱性も高いという優れたトータルバランスを持った金属材料、いわゆる革新的な金属材料は存在しない。それは、これらの性質がトレードオフの関係にあるからである。すなわち、引張強さを上げれば、伸びや靱性は低下してしまう。このトレードオフの関係を打破し、革新的構造材料を実現することを目標として、我々は研究(国家プロジェクト 産学共創基礎基盤研究プログラム ヘテロ構造制御)を推進してきた。また、現在では SIP (戦略的イノベーション創造プログラム) プロジェクトを推進中である。その成果として、0.1%C-2%Si-5%Mn 組成をベースとした 2 つのヘテロ組織を得た。一つはマルテンサイト組織で、引張強さ 1400 MPa 級で高延性と高靱性も同時に達成できる可能性を持つ。もう一つはフェライト+オーステナイト二相組織で、母相と分散相の微細化によって、引張強さは 1200 MPa レベルだが、30%を超える大きな一様伸びと局部伸びを併せ持つ。引張強さ x 全伸びバランスは、30000 MPa%を超え、既存鋼に比べ極めて優れている[1]。その優れた力学的特性発現メカニズムを解明すれば、革新的構造材料開発の切り口を見いだすことができ、次世代自動車用ハイテンの開発につながる。

今回、さらなる強度・延性の向上を目指して、C 添加量を 0.15-0.20%に上げ、Mn 添加量を 7%に上げた材料を作製した。温間圧延によってあらかじめ、微細フェライト+セメンタイト組織を形成し、それを熱処理によって、(a)フェライト+オーステナイトの 2 相組織と(b)マルテンサイト組織の 2 つの組織を生成した。フェライト+オーステナイトの 2 相組織に関しては、C 添加量を 0.15、0.20、0.30%、Mn が 7%と増えることによって、 γ 相の体積率が増加し、その安定性も増加することが期待できる。そのため、強度と延性の更なる同時向上が期待できる。マルテンサイト組織に関しては、転位密度の上限やその増加挙動も、5%Mn の場合と異なるはずである。いずれも変形中の変態挙動および転位密度変化を定量的に測定することが目的である。

実験：

試料は鋼であり、その組成は、Fe-0.15C-2.0Si-7Mn、Fe-0.2C-2.0Si-7Mn、Fe-0.3C-2.0Si-7Mn、および Fe-0.1C-2.0Si-10Mn、Fe-0.15C-2.0Si-5Mn、Fe-0.2C-2.0Si-5Mn(wt%)である。また、SUS304、

SUS316 も用いた。Mn 鋼に関しては、真空溶解、鍛造、温間溝ロール圧延を物質・材料研究機構にて行う。初期組織を微細フェライト+セメンタイト組織としておく。その材料を大学において熱処理を行いマルテンサイト組織としておく。SUS304、SUS316 に関しては、兵庫県立大学の圧延設備で、1 μm 超微細組織を作り出した。また、熱処理によって、2 μm、5 μm 組織も作り出しておく。

実験配置を Fig.1 に示す。引張試験片試料は平行部長さ 12 mm、幅 2.5 mm、厚さ 0.4 mm の引張試験片で、BL19B2 のゴニオメータ上に設置した引張り試験機に取り付けた。2 次元検出器 Pilatus を用いた。検出器の位置は、鉄の場合、2θ が 5-35° の範囲で計測できるように、適切な位置に設置した。

X 線のエネルギーは 30 keV とした。材料は鉄鋼材料であるが板厚 0.5 mm であれば十分な回折強度が得られた。引張速度はひずみ速度 0.26 mm/min となるように行った。引張荷重の測定には、最大荷重 20 N のロードセルを用いる。

引張試験を行いながら X 線回折を同時に行う、In-situ 引張試験 X 線回折を行った。応力-ひずみ曲線を取得しながら、応力-ひずみ曲線に対応する X 線回折データを得た。データの測定間隔は、1 s 程度とした。得られたデータをもとに、γ 体積率は式(1)を用いて、hkl 理論回折強度 R と得られた散乱角における α 相 (110)、(200)、(211) と γ 相 (111)、(200)、(220) のピーク面積強度比より求めた。

$$V_{\gamma} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{I_{\gamma}^j}{R_{\gamma}^j}}{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{I_{\gamma}^j}{R_{\gamma}^j} + \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{I_{\alpha}^j}{R_{\alpha}^j}} \quad (1)$$

結果および考察：

Fig.2 に、675°C、700°C、725°C でそれぞれ焼鈍した供試材 (0.15% C-5% Mn α+γ 鋼) の公称応力-公称ひずみ 曲線 (実線) と引張試験中の γ 体積率 (破線) を示す。675°C 焼鈍材では TS が 1000 MPa 級であり、最高荷重点で γ が残留していたのに対し、700°C 焼鈍材は引張強さが大きく向上し、最高荷重点で γ をつかいきり、引張強さ 1500 MPa-伸び 30%を示した。725°C 焼鈍材は TS が大きくなったものの途中で破断してしまい、全伸びが大きく減少した。これらの結果から、700°C が最適な焼鈍温度であることが明らかになった。700°C 焼鈍材 0.15C は、675°C 焼鈍材と比べて、初期 γ 体積率が 15%大きくなり、伸び 25%で使い切る適切な安定性を有したことで、超高強度高延性が発現した。700°C 焼鈍材の結果から、今まで γ 体積率が 30%までしか、γ 体積率と TS に相関があることが認められなかったが、γ 体積率が 50%まで γ 体積率と TS の関係にのることが明らかになった[1], [2]。

今後の課題：引張強さが 1500 MPa になる機鋼への理解を深める。Mn7%の効果を明らかにする。

参考文献：

- [1] 安達節展、鳥塚史郎、足立大樹、伊東篤志、鉄と鋼, **105**, 197 (2019).
- [2] 蓑田和樹、足立大樹、鳥塚史郎、CAMPS-ISIJ **31-2**, PS-99 (2018).

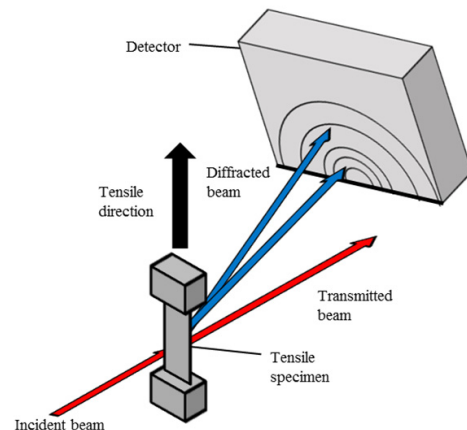


Fig.1 Schematic illustration of the in-situ transmission type X-ray diffraction during tensile test system.

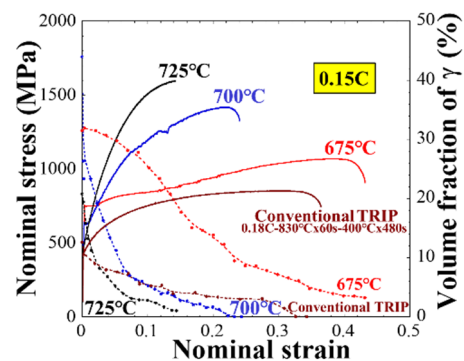


Fig.2 Nominal stress – strain curves and change in γ volume fraction with tensile strain in 0.15C-2Si-5%Mn steels annealed at 675°C, 700°C, 725°C for 1 h [2].