

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 4 月 16 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560852

研究課題名(和文) 化学的安定度制御による相変態を利用した超微細粒高強度オーステナイト鋼の創製

研究課題名(英文) Fabrication of Ultrafine Grained Austenitic Steel by Chemical Stability Controlled Phase Transformations

研究代表者

中田 伸生 (Nakada, Nobuo)

九州大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：50380580

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：次世代の自動車用高張力鋼板として期待されているTWIP鋼の更なる高強度化を目指して、Fe-Mn-C合金で得られるオーステナイト相の科学的安定度を炭化物の析出・溶解を利用して意図的に制御することで、相変態による結晶粒の微細化を図った。オーステナイト母相中に炭化物を析出させる部分溶体化処理により母相の安定度が低下することを確認し、冷間加工を必要とせず、熱処理のみでマルテンサイト変態を促進する手法を確立した。さらに、Mn量の少ない鋼種においては、昇温速度の増加に伴って逆変態の機構が拡散型からマルテンサイト型へと遷移することを確認した。

研究成果の概要(英文)：For further strengthening of TWIP steel which is expected as a next generation automotive steel sheet, a new heat treatment to promote precipitation and dissolution of carbide was applied for Fe-Mn-C alloys, leading to grain refinement via phase transformations. As a result, it was confirmed that austenite matrix is unstabilized after (austenite + carbide) two phase austenitization, namely partial solution treatment, and the heat treatment stimulates martensitic transformation in austenitic steel without any cold-deformation. In addition, it was found that reversion mechanism is discontinuously shifted from diffusive type to martensitic one with increasing heating rate in low Mn steels.

研究分野：金属組織学、構造材料工学

キーワード：鉄鋼材料 構造・機能材料 相変態 組織制御 超微細粒鋼

1. 研究開始当初の背景

構造用金属材料は、高い強度と十分な加工性(例えば、延性など)を兼ね備えることが不可欠であり、とくに自動車用鋼板などでは燃費向上による環境負荷低減を達成するために、引張強度 1.5GPa を超える高張力鋼板の開発が将来的に必要になると予想されている。その一つの解決策として、fcc 構造のオーステナイト (γ) 相を単相もしくは複相組織の一部として利用する試みがなされており、その中でも Twinning Induced Plasticity (TWIP) 鋼がアジア、欧州を中心に世界的な注目を集めている。TWIP 鋼は、多量の Mn と C の添加によって得られる γ 相を基地とすることで、fcc 構造の本質的な高加工硬化能に加えて、変形双晶、歪時効などの動的な組織変化を活用して優れた強度・延性バランスを実現する。その一方で、多結晶金属材料の強度・延性を改善する抜本的な手段は結晶粒の微細化であり、TWIP 鋼においても更なる高強度化を実現するためには結晶粒径を数 μm 程度まで微細化する必要があると報告されている。しかしながら、 γ を安定相とする本鋼ではフェライト鋼のような相変態がなく、これによる結晶粒微細化を利用できない。そのため、加工再結晶法を適用せざるを得ないが、十分な微細化のためには断面減少率 90% 以上の冷間加工を確保しなければならないことや集合組織の発達などが工業的に大きな課題となっている。

2. 研究の目的

申請者はステンレス鋼をはじめとする高合金鋼の組織変化に及ぼす合金元素ならびに加工熱処理の影響について系統的な研究を実施してきた。その中で、Fe-Ni-C 合金において図 1 に示すような炭化物の析出・溶解によって母相中の C 濃度を変化させ、 γ の化学的安定度を熱処理中に意図的に変えることで、安定な γ 鋼においても fcc \rightarrow bcc \rightarrow fcc 相変態が試料前面で生じることを見出した

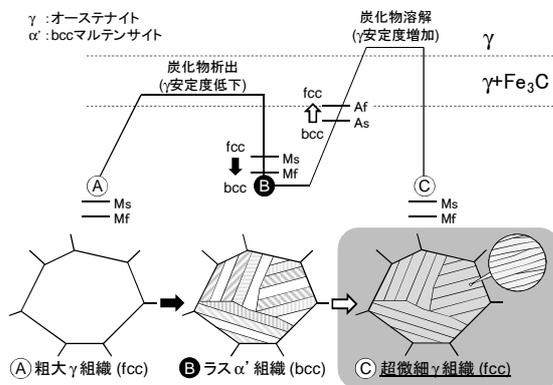


図 1. 安定オーステナイト鋼 (Fe-(Ni, Mn)-C 合金) における炭化物の析出・溶解を伴う相変態の模式図。

(Chemical Stability Controlled Phase Transformations)。とくに高 Ni 鋼では昇温過程でせん断型逆変態(マルテンサイト逆変態)が生じるため、転位を多量に含んだ幅 0.2 μm 程度の非常に微細なラス状 γ 組織 (ラス γ) を形成し、通常の γ 鋼に比べて 2 倍以上の高強度を発現することを明らかにした。鉄鋼材料において Ni が Mn とよく似た性質を持つことを考えると、Fe-Mn-C を基本組成とする TWIP 鋼 (代表組成 Fe-22%Mn-0.6C) においても同様の組織制御技術が適用できる可能性は極めて高い。そこで、本研究では炭化物の析出・溶解による γ 安定度制御技術を TWIP 鋼に応用し、最適な条件のもと、超微細粒高強度 γ 鋼を創製しようと思案した次第である。

3. 研究の方法

炭化物の析出・溶解によってラス γ を得るためには、次の 3 条件を満足しなければならない。1. Mn と C が完全に固溶した完全溶体化状態では冷却後も γ 組織が安定である。2. 炭化物が析出した部分溶体化状態では冷却後にマルテンサイト組織となる。3. 昇温過程でマルテンサイト逆変態が発現する。これらを満たす合金組成と熱処理条件を明らかにするため、Mn、C 量を種々変化させた鋼 (Fe-(5-30) %Mn-(0-1.5) %C 合金) を溶製し、炭化物が完全に溶解する完全溶体化処理後、また炭化物が部分的に析出する部分溶体化処理後の組織を解析し、試料全面で fcc \rightarrow bcc \rightarrow fcc 相変態が発現する条件を検討した。とくに、マルテンサイト逆変態を低合金鋼へ応用展開することを視野に入れ、Fe-5%Mn-0.15%C 合金における逆変態挙動の昇温速度依存性については詳細な調査を行った。

4. 研究成果

Mn、C 量に依存して、供試材のオーステナイト安定度は大きく変化し、高 Mn、高 C の条件下において室温で準安定なオーステナイト組織が得られた。さらに、部分溶体化によって生じる炭化物析出によってオーステナイト母相の安定度が変化することが確認され、図 1 に示した熱処理によって相変態が促されることが明らかとなった。また、高 Mn の試料では hcp マルテンサイトの生成が一部確認された。

室温で完全にマルテンサイト組織なる Fe-5%Mn-0.15%C 合金を種々の昇温速度 (20-450K/s) で加熱した場合、その bcc \rightarrow fcc 逆変態挙動に昇温速度依存性が確認され、変態機構が不連続に変化することがわかった。詳細な組織観察の結果 (図 2)、400K/s を境界として、それより低い昇温速度では拡散型逆変態、それ以上の高昇温速度ではマルテンサイト逆変態が発現することが示唆された。

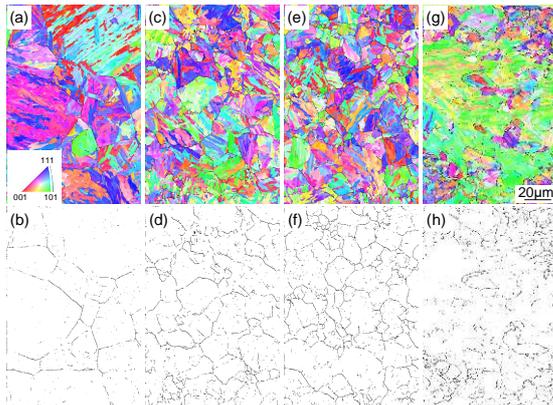


図 2 . EBSD 法により取得した Fe-5%Mn-0.15%C 合金の結晶方位マップと結晶粒界マップ。初期材 (a, b) と 200(c, d)、300(e, f)、450(g, h)K/s の昇温速度で加熱した逆変態材。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① Nobuo Nakada, Reiji Fukagawa, Toshihiro Tsuchiyama, Setsuo Takaki, Dirk Ponge and Dierk Raabe: ISIJ International, 査読有, 53(2013), pp. 1286-1288.
DOI:10.2355/isijinternational.53.1286
- ② Nobuo Nakada, Toshihiro Tsuchiyama, Setsuo Takaki, Dirk Ponge and Dierk Raabe: ISIJ International, 査読有, 53(2013), pp. 2275-2277.
DOI:10.2355/isijinternational.53.2275
- ③ Nobuo Nakada, Koichi Tsuboi, Tatsuro Onomoto, Toshihiro Tsuchiyama, Setsuo Takaki and Gerhard Inden: CALPHAD, 査読有, 47(2014), pp.168-173.
DOI: 10.1016/j.calphad.2014.09.006

[学会発表] (計 8 件)

- ① 中田 伸生, 深川 怜史, 土山 聡宏, 高木 節雄, Dirk Ponge, Dierk Raabe: マルテンサイト逆変態によって形成したオーステナイトの組織的特徴, 鉄鋼協会春季講演大会, 東京電機大学(東京), 2013年3月27日
- ② 中田 伸生, 土山 聡宏, 高木 節雄, Dirk Ponge, Dierk Raabe: 昇温速度に依存した低合金鋼の逆変態機構の遷移, 鉄鋼協会春季講演大会, 東京電機大学(東京), 2013年3月27日

- ③ Nobuo Nakada, Koichi Tsuboi, Tatsuro Onomoto, Toshihiro Tsuchiyama, Setsuo Takaki and Gerhard Inden: Prediction of Nitrogen Distribution in Solution-Nitrided Austenitic and Ferritic Stainless Steels, CALPHAD XLII, San sebastian(Spain), 2013年5月28日
- ④ 中田伸生: マルテンサイト逆変態によって形成したオーステナイト組織, (公社)日本金属学会 2013年秋期講演大会, 金沢大学(石川) 2013年9月18日
- ⑤ 中田伸生: 鉄鋼材料におけるマルテンサイト逆変態の発現条件とその組織, (一社)日本鉄鋼協会 第167回秋季講演大会, 東京工業大学(東京), 2014年3月22日
- ⑥ Nobuo Nakada, Toshihiro Tsuchiyama, Setsuo Takaki, Dirk Ponge and Dierk Raabe: Transition from Diffusive to Displacive Austenite Reversion in Low-Alloy Steel, 13th ALEMI Workshop, 関西セミナーハウス(京都), 2014年5月17日
- ⑦ 中田伸生: 固相窒素吸収処理を利用して形成される傾斜組織とその予測(招待公園), 第77回日本熱処理技術協会講演大会, 東京工業大学(東京), 2014年6月3日
- ⑧ Nobuo Nakada: Microstructural Characteristics of Austenite Formed from Lath Martensite via Martensitic Reversion(Invited Lecture), TMS Annual Meeting & Exhibition, Orlando(UAS), 2015年3月17日

[図書] (計 0 件)

なし

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

なし

○取得状況 (計 0 件)

なし

[その他]

ホームページ等

<http://search.star.titech.ac.jp/titech-ss/pursuer.act?event=org&k=1NbUEDj0rI&sToken=f6fdb9e247e29a35b06ac02b1515c971&from=organization>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中田 伸生 (NAKADA, Nobuo)
九州大学・大学院工学研究院・助教
研究者番号：50380580

(2) 研究分担者

田中 將紀 (TANAKA, Masaki)
九州大学・大学院工学研究院・准教授
研究者番号：40452809

(3) 連携研究者

なし