

機関番号：16201

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2009～2010

課題番号：21760589

研究課題名(和文) 超微細粒高マンガン鋼の高速変形特性の改善

研究課題名(英文) Improvement of high speed plastic deformation behavior of ultrafine grained high Mn steel

研究代表者

上路 林太郎 (UEJI RINTARO)

香川大学・工学部・准教授

研究者番号：80380145

研究成果の概要(和文)：高速変形時と静的変形時の強度差は静動差と呼ばれ、実用上その値は大きいことが望まれる。本研究では、高マンガン TWIP(Twinning Induced Plasticity)鋼の静動差の向上を試みた。種々の金属組織を有する TWIP 鋼を作製し、最大 $10^3/\text{sec}$ までの各種ひずみ速度の引張試験を行った。完全再結晶組織を有する場合、平均結晶粒径の減少に伴い高強度化するが、静動差は減少する。一方で、粒径 $1 \mu\text{m}$ の再結晶組織中にラメラ状転位組織を導入すると、強度と静動差の同時向上を達成できた。変形後の組織観察により、変形双晶の有無と静動差の増減が対応することが明らかとなった。

研究成果の概要(英文)： Difference between the strength at high speed and that at low speed (quasi-static rate) (DSHQ) is desired to become larger value for industrial applications. The aim of this study was to obtain an appropriate DSHQ in high Mn TWIP (Twinning induced plasticity) steel. The samples with different microstructures were fabricated and then those plastic behaviors were measured by room temperature tensile test at a strain rate up to $10^3/\text{sec}$. When the sample was fully recrystallized, the strength becomes larger but the DSHQ decreases with decreasing of the mean grain size; whereas the higher strength with larger DSHQ can be achieved successfully by means of the mixture of fine grains and lamellar dislocation structure. The microstructural observations clarified that the improvement of DSHQ is corresponded with the appearance of twinning deformation.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,500,000	750,000	3,250,000
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：材料組織学

科研費の分科・細目：材料工学・材料加工・処理

キーワード：鉄鋼材料、構造用材料、力学特性、オーステナイト、高速変形、金属材料、変形双晶、塑性変形

1. 研究開始当初の背景

近年、TWIP 鋼と呼ばれる新しい高 Mn オーステナイト鋼が、ヨーロッパや韓国で注目を

受けている。構造用高 Mn 鋼として著名なものには、Hadfield 鋼 ($\sim 15\% \text{Mn}$)があるが、TWIP 鋼では、25%-30%程度の多量の Mn に加え

て、3%程度のAl、Siを含有する。また、TWIP鋼の室温における積層欠陥エネルギー(SFE)は 40mJ/m^2 と低く、高い引張強さ($\sim 600\text{MPa}$)と大きな均一伸び($\sim 90\%$)に加えて、高い衝撃吸収エネルギーを示す。さらに、オーステナイト系ステンレス鋼(例えばFe-18Cr-8Ni)と比べると、構成成分が安価であることから、低価格で高付加価値の鉄鋼材料として、自動車構造用材料等への実用化が期待されている。

一方で、TWIP鋼の結晶粒を $1\mu\text{m}$ 程度にまで微細化した場合、ひずみ速度を $10^{-3}/\text{sec}$ (準静的条件)から $10^3/\text{sec}$ (高速変形・自動車事故相当)に相当する速度まで増大させた場合の降伏強度の上昇分、すなわち静動差は減少することが明らかとなった。一般に、静動差は大きいほど良いとされている。そのため、微細粒TWIP鋼における静動差の向上は、実用的な観点から急務である。加えて、超微細粒域を含む広い粒径範囲において、静動差を系統的に調べた研究例は数少ない。

2. 研究の目的

本研究では、静動差の向上を目標とし、完全再結晶組織を有するサブミクロンを含む種々の粒径を有するTWIP鋼の双晶変形の有無と静動差の変化の相関と、双晶変形の有無を初期方位により制御したうえで静動差と双晶変形の相関を解明する基礎研究を行い、得られた知見より、部分再結晶組織による静動差向上メカニズムを解明する。

3. 研究の方法

本研究では、室温にて安定オーステナイト状態となる $3\text{mass}\%\text{Mn}-3\%\text{Al}-3\%\text{Si}-\text{Fe}$ という化学組成を有するTWIP鋼を用いた。TWIP鋼の結晶粒微細化は、圧下率95%程度の室温での圧延と種々の温度での焼鈍により再結晶組織を作成する。結晶方位の測定は走査型電子顕微鏡(SEM)内のEBSD(Electron Back Scattering Diffraction)法により実施した。同時に低温焼鈍による部分再結晶組織を作成した。

強度と静動差の測定は、検力ブロック式材料試験機を用いて行った。検力ブロック式材料試験機を用いれば、同一の試験機系により、 $10^{-3}/\text{sec}$ から $10^3/\text{sec}$ までの各種ひずみ速度での引張試験を行い、応力ひずみ曲線を測定する。

変形後の組織を透過型電子顕微鏡(TEM)を用いて観察し、変形双晶の有無と引張軸の方位の調査を行なった。得られた結果より部分再結晶組織化と結晶方位制御による静動差の向上を図る。

4. 研究成果

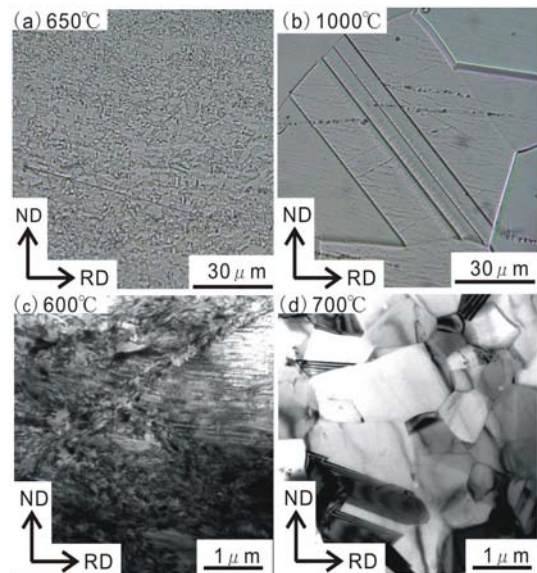


図1 650°C30分間(a)、1000°C30分間(b)、600°C5分間(c)、あるいは700°C5分間(c)焼鈍を行うことにより得られたTWIP鋼の組織。(a)(b)は光学顕微鏡、(c)(d)はTEMによる。

図1に各種加工熱処理により得たTWIP鋼の組織を示す。650°C(a)から1000°C(b)までの各温度での30分間焼鈍を施すことにより、平均粒径 $1.1\mu\text{m}$ から $49.6\mu\text{m}$ までの等軸形状の結晶粒からなる完全再結晶組織を有するTWIP鋼を得ることができた。また、600°C(c)から700°C(d)までの各温度での比較的短時間(5分間)焼鈍を施すことにより、加工組織が残存しつつ、再結晶粒径が $0.8\mu\text{m}$ から $1.3\mu\text{m}$ の部分再結晶組織を有するTWIP鋼を得ることができた。組織観察の結果得られた各種短時間焼鈍材の平均粒径と再結晶率を図2に示す。短時間焼鈍材では粒径は大きく変化せず、再結晶率のみが変化していることが分かる。

図3に完全再結晶組織を有するTWIP鋼のひずみ速度 $10^{-3}/\text{sec}$ と $10^2/\text{sec}$ での引張試験により得られた応力-ひずみ曲線を示す。 $10^3/\text{sec}$ の試験は実施したが、弾性変形波の共振に起因すると思われる、 100MPa 程度の振幅応力振動が観察されたため、正確を期すためここでは示していない。ただし、おおむねいずれの試料でも $10^2/\text{sec}$ と $10^3/\text{sec}$ では大きく変化しない応力ひずみ曲線が得られた。同じひずみ速度で比較した場合、焼鈍温度が減少すほど、すなわち、平均結晶粒径が小さくなるほど、強度が増大し延性が低下する。また、いずれの組織を有する材料においても、ひずみ速度を増大させると強度が上昇し、延性がさらに低下する傾向がみられる。

図4に部分再結晶組織を有するTWIP鋼のひずみ速度 $10^{-3}/\text{sec}$ と $10^2/\text{sec}$ での引張試験により得られた応力-ひずみ曲線を示す。全

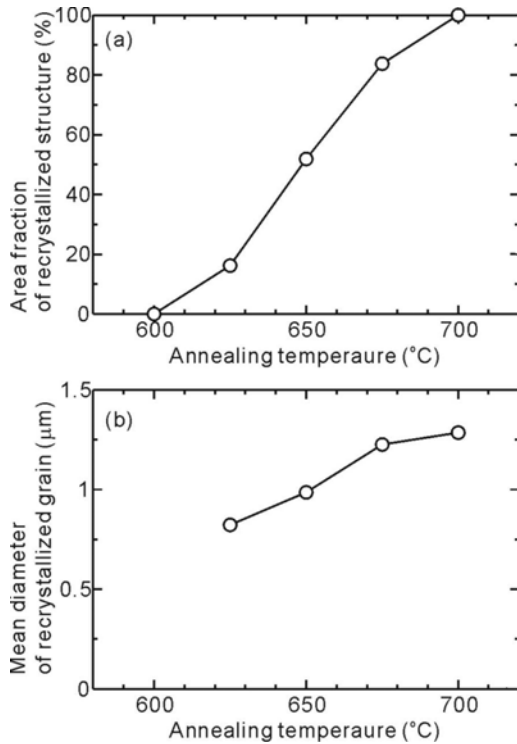


図2 各種温度で5分間焼鈍された TWIP 鋼の再結晶率(a)と平均粒径(b)。

面加工組織の 600°C 焼鈍材では高い 0.2% 耐力を得ることができたが、加工硬化と均一伸びがほとんど存在しなかった。また、700°C 焼鈍材では降伏点降下現象が見られた。加工組織の残存量が増加していくほど、あるいはひずみ速度が大きくなると、強度が上昇し延性が低下している。

これまでに、BCC 系鉄鋼材料やアルミニウム合金において、平均粒径 1 μm 程度の結晶粒微細化により、強度は大幅に上昇するものの、均一伸びが低下することが報告されているが、TWIP 鋼の場合、結晶粒を微細化しても強度-延性バランスを保ちやすいことが明らかとなっている。本研究では、部分再結晶組織を有する場合であっても、良好な強度延性バランスを有しやすいことが明らかとなった。

図 5 に各種焼鈍材の引張試験より得られた活性化体積と 0.2% 耐力の関係を示す。図中 d は完全再結晶組織を有する試料の平均粒径、 F_r は部分再結晶組織を有する試料の再結晶率を示す。活性化体積 v^* とは静動差の逆数に比例するものであり、幾何学的に $v^* \equiv bLd^*$ と定義されている。ここで、 b はバーガスベクトルの大きさ、 L と d^* は、それぞれ一度の熱活性化過程において動く転位の切片長さや移動距離である。通常、活性化体積は、バーガスベクトルの大きさで規格化されて示されるが、ここでは後述する考察のため、生の活性化体積の値を示している。また、活

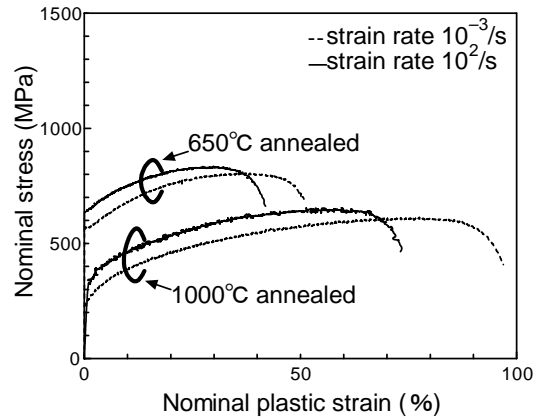


図3 完全再結晶組織を有する TWIP 鋼の公称応力公称ひずみ曲線。

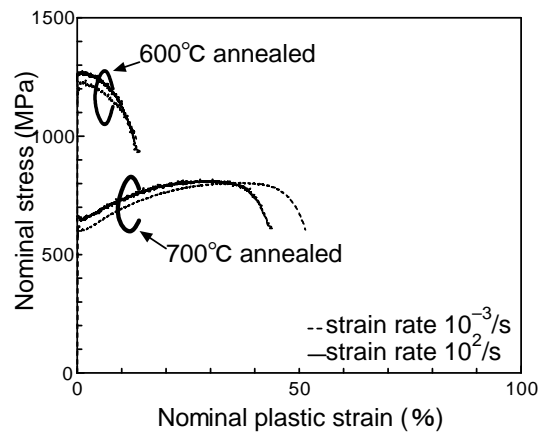


図4 部分再結晶組織を有する TWIP 鋼の公称応力公称ひずみ曲線。

性化体積の計算に当たっては、Taylor 因子は 3 とした。活性化体積の増大は静動差の減少に対応する。完全再結晶組織を有する TWIP 鋼では、強度の増大に伴い活性化体積が増大する。一方で、部分再結晶組織を有する場合、強度の増大に伴い活性化体積が減少するという逆の傾向を示すことが明らかとなった。

完全再結晶と部分再結晶において静動差と強度の関係が異なる結果となった理由は、完全転位と部分転位のバーガスベクトルの大きさに注目することにより説明できる。完全再結晶の場合、結晶粒微細化に伴い変形双晶が抑制されることが知られている。これは部分転位が発生することによって発生する双晶が結晶粒の微細化にともない減少したため、完全転位の増加によりバーガスベクトル b が大きくなったためと考えられる。部分再結晶組織を有する TWIP 鋼では、加工組織残存量の増加により活性化体積は小さくなった。これは、ナノスケールの平均間隔を有する転位セルバウンダリを導入することにより再び変形双晶が活性化されたためであると考えられる。

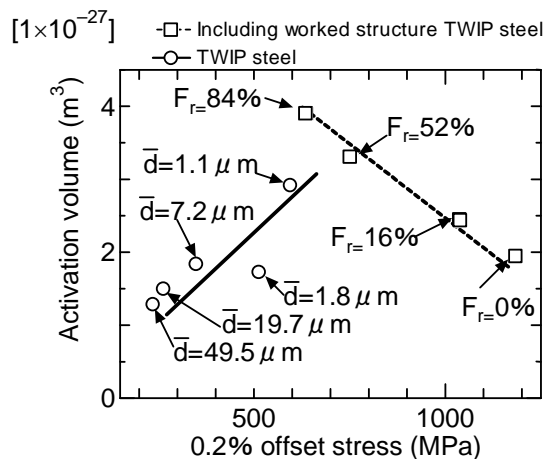


図5 各種組織を有する TWIP 鋼の $10^{-3}/\text{sec}$ 変形時の 0.2%耐力と活性化体積の関係。

以上と同様の結果は 15%Mn 鋼においても確認された。結論として、部分再結晶組織の導入により強度と静動差の同時向上が可能であることが明らかとなった。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 5 件)

- ① R. Ueji, Y. Okitsu, T. Nakamura, Y. Takagi and Y. Tanaka, Journal of Physics: Conference Series, 240(2010) 012029. (査読有)
- ② G. Dini, R. Ueji, A. Najafizadeh, S.M. Monir-Vaghefi, Materials Science and Engineering A, 527 (2010), pp. 2759- 2763. (査読有)
- ③ G. Dini, R. Ueji, A. Najafizadeh, Materials Science Forum, 654-656(2010) pp.294-297. (査読有)
- ④ G. Dini, A. Najafizadeh, R. Ueji, S.M. Monir-Vaghefi, Materials Letters, 64 (2010), pp.15-18. (査読有)

[学会発表] (計 4 件)

- ① 上路林太郎, 高マンガン TWIP 鋼および高マンガン TRIP 鋼の塑性変形挙動と結晶粒微細化, 日本材料学会北陸信越支部特別講演会「金属材料の機械的特性と内部組織の関係」(招待講演), 平成 23 年 2 月 18 日, 金沢大学
- ② 上路林太郎 他, 高マンガン鋼の結晶粒微細化に伴う ϵ マルテンサイト生成挙動と加工硬化, 日本鉄鋼協会 第 160 回秋季講演大会, 平成 22 年 9 月 26 日, 北海道大学
- ③ R. Ueji et al., formation of 15%Mn steel with fine lamellar structure consisting

of ferrite and austenite phases, AISTech 2010, The Iron & Steel Technology Conference and exposition, AIST (米国鉄鋼協会), 平成 22 年 5 月 3 日 David L. Lawrence convention center (Pa., USA)

- ④ R. Ueji et al., Mechanical properties of 15%Mn Steel with FineLamellar Structure Consisting of Ferrite and Austenite Phases, 15th International Conference on the Strength of Materials; ICSMA-15 平成 21 年 9 月 17 日 ドレスデン工科大学(ドイツ)

[その他]

成果の一部は以下のホームページでも紹介している。

<http://www.eng.kagawa-u.ac.jp/~ueji/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

上路 林太郎 (UEJI RINTARO)

香川大学・工学部・准教授

研究者番号：80380145