

高硬度・高靱性過共析鋼「TOUGHFIT®」の開発

杉本 隼之*

山本 幸治**

萩原 幸司¹⁾***

徳永 透子²⁾***

南 埜 宜 俊****

1. はじめに

近年、カーボンニュートラル(CN)推進への対応は喫緊の課題であり、各メーカーで様々な取組みが進められている。自動車や建設機械、産業機械といった特殊鋼が使用される代表的な業界では、燃費や電費の改善に繋がる部品の小型・軽量化、さらには部品の製造工程における熱処理簡素化によるCO₂排出量の低減などCNへ繋がる動きが加速している。

これらの部品に共通して求められる特性として、耐摩耗性と高い疲労強度を得るための高硬度と部品稼働中などの突発的な衝撃に対応するための高靱性が挙げられる。

しかしながら鋼の硬度と靱性はトレードオフの関係であり、高硬度で耐摩耗性が高い過共析鋼であるJIS SUJ2鋼(以下SUJ2と表記)は軸受鋼として幅広く活用される一方で靱性は極めて低いことが一般的に知られている(図1)。このような過共析鋼が低靱性となる理由は、鋼中に多量に存在する炭化物に由来しており、特に旧オーステナイト粒界上に存在する炭化物がき裂の伝ば経路として作用するため、粒界破壊を引き起こすことである。

そのため、表面硬さと靱性の両立が要求される部品では、肌焼鋼(JIS SCM420 鋼に代表されるような、炭素量が0.25 mass%以下の低炭素合金鋼、以下SCM420と表記)への浸炭焼入れが用いられている。

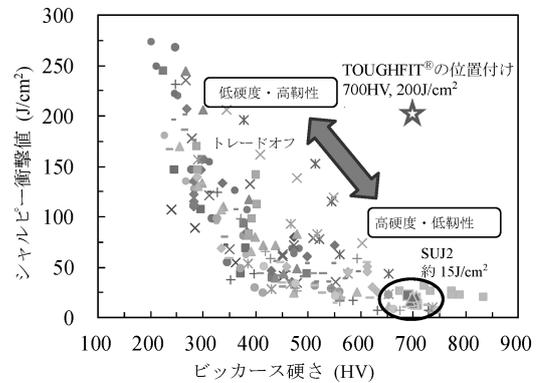


図1 硬度と靱性の関係と TOUGHFIT® の位置付け。

肌焼鋼への浸炭焼入れでは、表面は高炭素のため高硬度であり、芯部は素地の炭素量であることから高靱性を保つことができる。一方で、浸炭には長時間を要すること、浸炭パターンは部品の設計仕様に応じて種々異なることから工程負荷の大きな熱処理である。

さらには昨今のCNへの対応から、生産工程で多量のCO₂を排出する浸炭処理は省略が望まれており、浸炭に頼らず高硬度と高靱性の両立が可能な鋼に対する需要はますます高まっている。

山陽特殊製鋼株式会社、コマツ、ならびに国立大学法人大阪大学からなる産学連携チームは硬度と靱性のトレードオフを打破するべく、過共析鋼において粒界破壊の要因となる旧オーステナイト粒界上の炭化物の有害性低減、さらには結晶粒内の組織の適正化に取組み、高硬度と高靱性の両立が可能な合金成分と熱処理条件を見出した⁽¹⁾⁽²⁾。これら共同研究の成果を基に開発し量産化した高硬度・高靱性過共析鋼がTOUGHFIT®(タフフィット)である。以下にその特長を示す。

2. TOUGHFIT® 開発のポイント

(1) 合金成分設計

TOUGHFIT® の概略成分を表1に示す。TOUGHFIT® はずぶ焼入れにて高硬度を得ることを目的に、0.6 mass%のC

* 山陽特殊製鋼株式会社 研究・開発センター 基盤研究室 材料研究グループ; 研究員

** コマツ 生産本部 生産技術開発センタ パワートレイングループ材料・熱処理チーム; 技師

*** 名古屋工業大学 大学院工学研究科 工学専攻 材料機能プログラム; 1)教授 2)助教

**** 大阪大学; 名誉教授
Development of High Hardness and High Toughness Hypereutectoid Steel “TOUGHFIT®”; Toshiyuki Sugimoto*, Koji Yamamoto**, Koji Hagihara***, Toko Tokunaga*** and Yoritoshi Minamino****(*Material Research Group, Basic Research Office, Research & Development Center, Sanyo Special Steel Co., Ltd. **Power Train Group, Manufacturing Engineering Development Center, Komatsu Ltd. ***Department of Physical Science and Engineering, Nagoya Institute of Technology. ****Osaka University)

2024年11月1日受理[doi:10.2320/materia.64.117]

を添加した過共析組成としている。焼入れ性と焼戻軟化抵抗性の確保のため、Cr, Si, Moを適宜添加した成分設計であり、微量添加しているVは後述する高靱性化メカニズムのキーとなる元素である。その詳細は本章の(3)項で記述する。

(2) 高硬度・高靱性化熱処理「FM 処理」

TOUGHFIT®はFM(Full Martensite)処理と称する高硬度・高靱性化熱処理を施すことでその優れた特性を発揮する。FM処理のヒートパターンを図2に示し、FM処理で目指す組織像を図3に示す。FM処理は鋼中の粗大炭化物の固溶と組織のパーライト化を目的とした固溶化処理と、オーステナイトとV系炭化物の二相域(900~950°C)からのずぶ焼入れからなる⁽³⁾⁽⁴⁾。焼戻しを含めた一連の熱処理にて、優れた靱性を維持しつつユーザーにて求められる硬度に応じて熱処理条件を調整することが可能である。また、加工性確保のため、固溶化処理と焼入れの間に軟化焼鈍を追加することもできる。

(3) 高硬度・高靱性化のメカニズム

TOUGHFIT®は合金成分設計でも述べた通り、微量なV添加がキーとなっている。TOUGHFIT®は一般的な過共析鋼(SUJ2等)の焼入れ温度と比べ、高い温度から焼入れを行っている。これは旧オーステナイト上の炭化物を固溶させ、粒界破壊の抑制を狙っているためであるが、通常このような高温焼入れでは旧オーステナイト粒の粗大化が生じ、粒界破壊を招く一因となる。TOUGHFIT®はVを微量添加することで、微細なV系炭化物を形成し、図4に示すように微細分散させることで、ピン止め効果によって整細粒化を図っている。図5にV添加の有無によるFM処理を施した際

表1 TOUGHFIT®の概略成分。(mass%)

C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	V
0.6	1.0	0.4	-	添加	0.3	添加

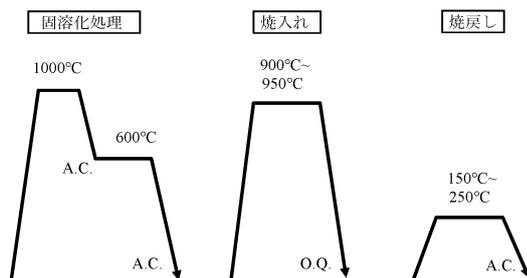


図2 FM処理のヒートパターン。

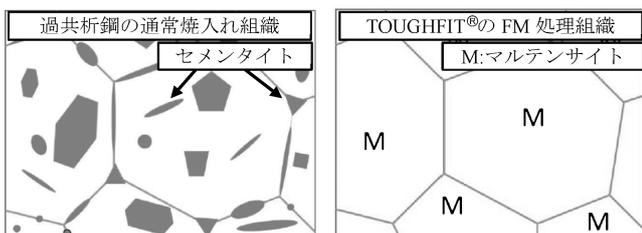


図3 FM処理で目指すTOUGHFIT®の組織イメージ。

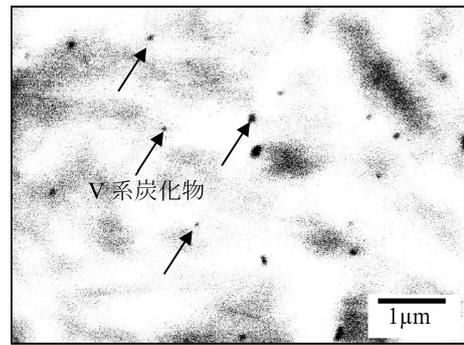


図4 焼入焼戻し後のV系炭化物の微細分散状態のSEM観察結果。

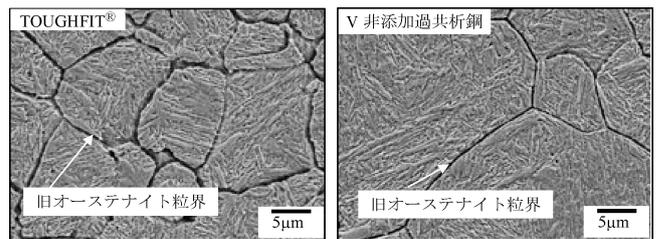


図5 TOUGHFIT®とV非添加過共析鋼における旧オーステナイト粒径のSEM観察結果(飽和ピクリン酸腐食)。

の結晶粒径の違いを示す。Vを添加したTOUGHFIT®は整細粒であり、旧オーステナイト粒界上の炭化物固溶と併せて、高硬度・高靱性が発現していると考えている。

3. TOUGHFIT®の特性

(1) 耐衝撃特性(2mm-10RCノッチ, 室温シャルピー衝撃試験)

シャルピー衝撃試験にてTOUGHFIT®の靱性評価を実施した結果および試験後の破面を図6に示す。

SUJ2のずぶ焼入れ品は61HRCの硬度で17 J/cm²のシャルピー衝撃値であることにに対し、TOUGHFIT®は60HRCの硬度で211 J/cm²のシャルピー衝撃値であり、極めて高い靱性を示した。また、破面観察から、SUJ2は粒界破壊を呈しており、その破断面はほぼ塑性変形がみられない。これ

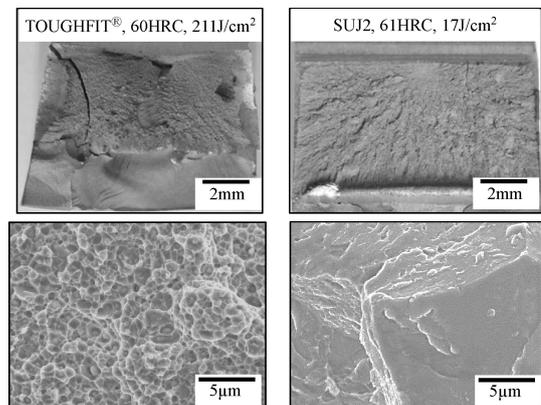


図6 シャルピー衝撃試験結果と試験片破断面の光学顕微鏡観察ならびにSEM観察結果(破面上部が10RCノッチ面)。

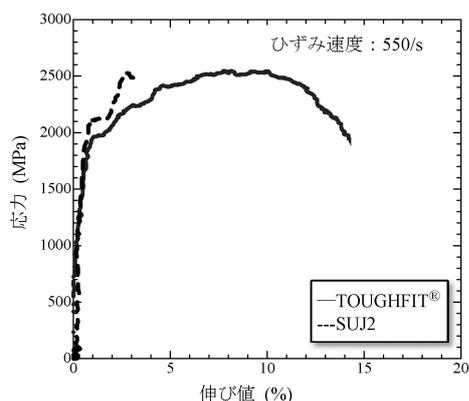


図7 高速引張試験における荷重変位曲線.

表2 高速引張試験における機械的性質。(ひずみ速度：550/s)

鋼種	引張強さ (MPa)	破断伸び (%)	絞り (%)
TOUGHFIT®	2520	14.7	18.5
SUJ2	2540	2.8	0

に対して TOUGHFIT® はディンプル状の延性破壊を呈しており、またその破断面は大きく塑性変形がみられることから高い靱性を有することを示している。

(2) 引張特性

高速稼働環境で使用される部品を想定した高速引張試験(ひずみ速度：550/s)にて TOUGHFIT® の延性を評価した結果を図7ならびに表2に示す。

代表的な過共析鋼である SUJ2 は、2500 MPa 級の高い引張強さを示すが、破断伸びは3%程度であり、ネッキングは生じない。TOUGHFIT® は SUJ2 と同様の2500 MPa 超の高い引張強さを示しながら、さらには15%程度の大きな破断伸びを併せ持つ。この破断伸びは10%程度の大きな均一伸びと5%程度の不均一伸びからなり、破断に至る前に明瞭なネッキングが発現するという、過共析鋼では極めて特異な性質を示す。この破断伸びが大きくネッキングを示すという特性は、部品が突発的に破損せずに前兆として捉えることが出来ること、すなわち破損前に危険箇所を察知できるという点で安全係数の観点から重要かつ有益な特性である。

TOUGHFIT® のような、高硬度と高靱性そして高延性を併せ持った過共析鋼はこれまで報告されておらず、従来の過共析鋼の一般常識を覆すような革新的な機械的性質を有することは TOUGHFIT® の優れた特徴である。

4. TOUGHFIT® の市場実績

産学連携による研究成果に基づいて開発された TOUGHFIT® の市場実績として、コマツにて実用化されたトンネルボーリングマシン(TBM)のカッターリング用鋼への適用事例を紹介する。図8にTBMとカッターリングの概要図を示す。TBMのカッターリングは岩盤に押し当て回転させることで岩盤を破碎する建機部品であり、高い耐摩耗性と耐衝撃性が要求されることから、従来は多量のレアメタルが添加された冷間ダイス鋼が用いられていた。本開発鋼である

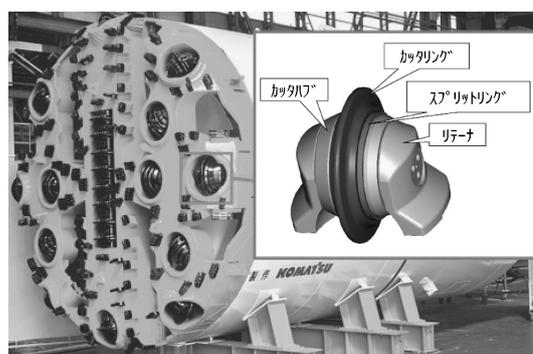


図8 TOUGHFIT® が適用されたTBMの外観とカッターリングの概要.

TOUGHFIT® は、一般的な軸受鋼や機械構造用鋼に類した省合金組成でありながら、従来鋼と比べて優れた硬度と耐摩耗性ならびに耐衝撃性を有することが種々の実験や検証から確認されており、カッターリング用鋼として採用に至っている。実際に市場に投入された TOUGHFIT® 製のカッターリングを搭載した TBM は良好な実績を積んでいる。

5. TOUGHFIT® のさらなる市場展開

TOUGHFIT® のさらなる市場展開として、自動車や建設機械、産業機械といったあらゆる分野における軸受や駆動系部品への適用を見込んでいる。これらの部品は表面硬さと芯部靱性を両立する観点から肌焼鋼への浸炭焼入れが多用されているが、CO₂を多量に排出する硬化熱処理であるため、近年世界的に重要性が高まっているCNを進める上で、その代替方法が望まれている。これら肌焼鋼の代替として、ずぶ焼入れにて高硬度と高靱性の両立が可能な TOUGHFIT® が適用できると考えており、ギヤやシャフトを想定した疲労特性調査からも優れた特性を示すことを報告している⁽⁵⁾。

6. まとめ

TOUGHFIT® はトレードオフの関係にある硬度と靱性を高位に両立する画期的な過共析鋼であり、60HRCの高硬度でありながらSUJ2の10倍以上の靱性を有し、さらには優れた延性として大きな均一伸びとネッキングを示すなど、革新的な特性を有した鋼である。

TOUGHFIT® は既に量産化しており、浸炭省略や部品の小型・軽量化に繋がるエコプロダクトとして需要家から好評を得ており、今後の適用拡大が期待される。

文 献

- (1) 南埜宜俊, 萩原幸司, 山本幸治, 杉本隼之: 熱処理 62 (2022), 79-87.
- (2) 特許第7223997号 公報.
- (3) 南埜宜俊, 萩原幸司, 相原 巧, 平岡和彦, 藤松威史, 杉本隼之, 宮部一夫, 浜坂直治, 山本幸治: 山陽特殊製鋼技報, 26(2019), 36-42.
- (4) 高橋春香, 常陰典正, 藤松威史: 山陽特殊製鋼技報, 28(2021), 2-13.
- (5) 山陽特殊製鋼技報, 30(2023), 50-55.