

第48回 日本金属学会技術開発賞受賞 高硬度・高靱性過共析鋼「TOUGHFIT®」の開発

The 48th Technical Development Award (The Japan Institute of Metals and Materials)
Development of High Hardness and High Toughness Hypereutectoid Steel "TOUGHFIT®"

杉本 隼之*

SUGIMOTO Toshiyuki

1. はじめに

当社は、公益社団法人日本金属学会より、「高硬度・高靱性過共析鋼「TOUGHFIT®」(タフフィット)の開発」に対して、第48回 技術開発賞を受賞した。同賞は、創意あふれる開発研究を推奨する目的で、金属工学ならびにこれに関連する新技術・新製品などの独創的な技術開発に携わった技術者に対し、授与される賞である。以下では、その受賞技術について受賞対象となった著書¹⁾から技術情報を引用しつつ紹介する。

2. 開発の背景

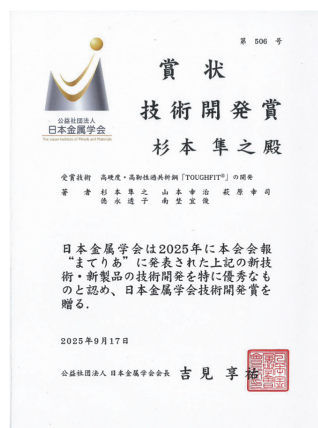
近年、カーボンニュートラル(CN)社会の実現に向けて、各メーカーで様々な取り組みが進められている。特殊鋼が使用されている業界での代表的な事例として、自動車や建設機械、産業機械などでは、部品の小型化・軽量化による燃費や電費の向上、さらにはCO₂排出量低減を狙った部品製造工程での熱処理簡素化など、CNに繋がる取り組みが進められている。

これらの部品に対する共通ニーズとして、高い耐摩耗性

と疲労強度を狙った高硬度と各種機器稼働中に発生しうる突発的な衝撃負荷による部品および機器の破損を防止することを狙った、延靱性の高位両立が求められている。しかしながら鋼の硬度と靱性は一般的にトレードオフの関係にある(図1)。例えば、JIS SUJ2鋼(以下SUJ2と表記)に代表されるような過共析鋼は、高硬度のマルテンサイト素地に微細な炭化物が分散しており、優れた耐摩耗性を有するが、旧オーステナイト粒界上に分布する炭化物が脆性破壊の要因となることで靱性が低くなる。

そのため、市場においては表面硬度と靱性の両立が要求されるような部品に対しては、JIS SCM420(以下SCM420と表記)などに代表されるような低合金組成の肌焼鋼に対する浸炭焼入れなどが用いられており、部品の芯部は素地炭素量による高い靱性を維持しつつ、浸炭によって表面は高い炭素量による高硬度が得られる。

一方で浸炭熱処理は部品ごとに種々の熱処理パターンが必要となるため、工程負荷の高い熱処理である。さらに、過共析鋼でおこなわれているずぶ焼入れと比べて長時間の熱処理となることや、浸炭ガスの使用により多量のCO₂が排出されるため、CN対応の点からも浸炭熱処理の省略が



日本金属学会技術開発賞牌と賞状

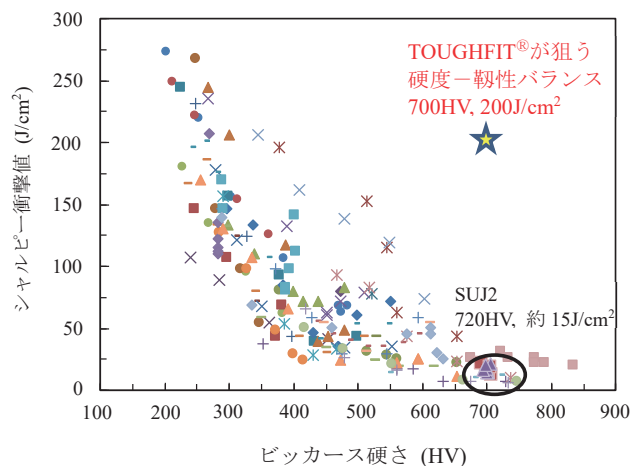


図1 硬度と靱性の関係とTOUGHFIT®の位置付け

* 研究・開発センター 基盤研究室 材料研究グループ 博士(工学)

望まれており、浸炭に頼らない熱処理、およびこれを可能にしつつ強度を両立させる「高硬度・高靱性過共析鋼」に対する市場の期待と高い需要があった。

当社、コマツ、ならびに国立大学法人 大阪大学(注：現在は国立大学法人 名古屋工業大学が引継ぎ研究中)からなる産学連携チームでは、硬度と靱性のトレードオフを克服するべく、過共析鋼において脆性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、ならびに結晶粒内の組織適正化に取り組み、高硬度と高靱性の両立が可能な合金成分と熱処理技術を見出した。高硬度・高靱性過共析鋼「TOUGHFIT®」はこれらの共同研究成果を基に開発・量産化された鋼である。

3. 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®は硬化熱処理後に700Hvクラスの高硬度とするため、0.6mass%Cを添加した過共析組成を基本に設計されている。その他の特徴的な添加元素として、焼入性の確保のためCr,Moを添加し、焼戻し軟化抵抗性確保のためにSi,Moを添加している。Vは後述する高靱性化熱処理のキーとなる元素であり、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処理の基本的な熱処理パターンを図2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℃)からのずぶ焼入れからなる^{4,5)}。また、切削等での加工性確保を目的として、固溶化処理と

表1 TOUGHFIT®の化学成分 (mass%)

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

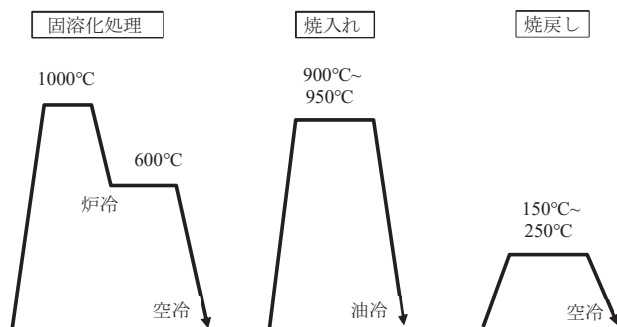


図2 FM処理の基本的なヒートパターン

焼入れの間に軟化焼鈍(例えば球状化焼鈍)を追加することもできる。焼戻しを含めた一連の熱処理にて、ユーザーの狙いとする硬度・靱性に応じてその条件を適宜調整し、使用することも可能である。

(3)高硬度・高靱性化のメカニズム

TOUGHFIT®は(1)項の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、SUJ2に代表される一般的な過共析鋼と比べて高い温度で焼入れを実施している。その狙いはマトリクス中の炭化物、特に過共析鋼において粒界破壊を助長する旧オーステナイト粒界上の炭化物の固溶である。通常、高温焼入れではピン止め効果による粗粒化抑制を担っていた炭化物が固溶するため、旧オーステナイト粒の粗大化が生じて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3に示すように微細分散させることでピン止め効果による整細粒化を図っている。図4にV添加の有無による、FM処理を施した際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。

4. 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)

TOUGHFIT®の耐衝撃特性をシャルピー衝撃試験で評価

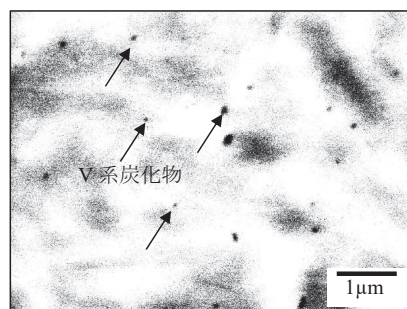


図3 焼入焼戻し後のV系炭化物の微細分散状態のSEM観察結果

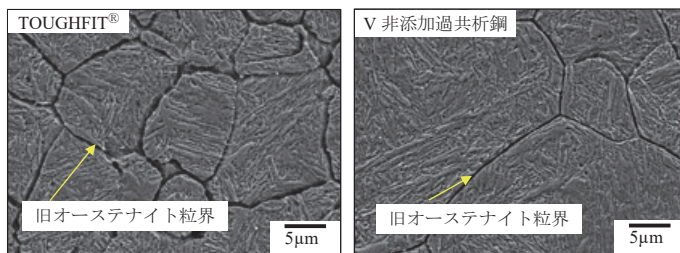


図4 TOUGHFIT®とV非添加過共析鋼における旧オーステナイト粒径のSEM観察結果（飽和ピクリン酸腐食）

した結果を図5に示す。比較材として、同一硬さ水準かつ代表的な過共析鋼であるSUJ2のずぶ焼入れ材を用いた。SUJ2は硬度61 HRCにおいてシャルピー衝撃値17 J/cm²を示したのに対し、TOUGHFIT®は硬度60 HRCで211 J/cm²の衝撃値を示しており、SUJ2と比較して10倍以上の極めて高い靱性を示している。破面観察では、SUJ2は粒界破壊を呈しており、破面に顕著な塑性変形がほとんど認められない。これに対し、TOUGHFIT®はディンプル状の延性破壊を示し、破面全体に大きな塑性変形が観察された。この結果は、TOUGHFIT®が高い靱性を有する材料であ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、ひずみ速度

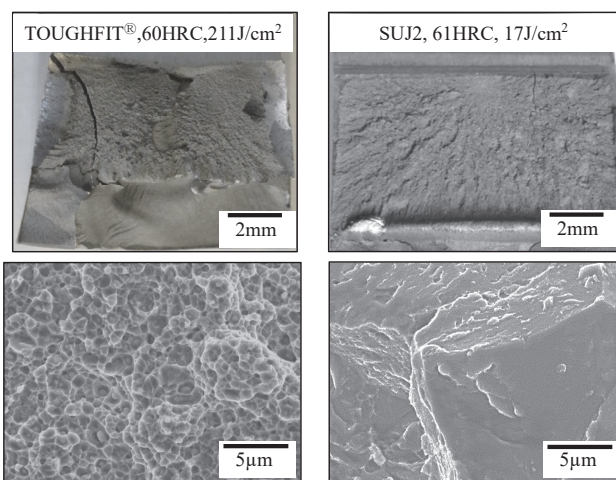


図5 シャルピー衝撃試験結果と試験片破断面の光学顕微鏡観察ならびにSEM観察結果（破面上部が10RCノッチ面）

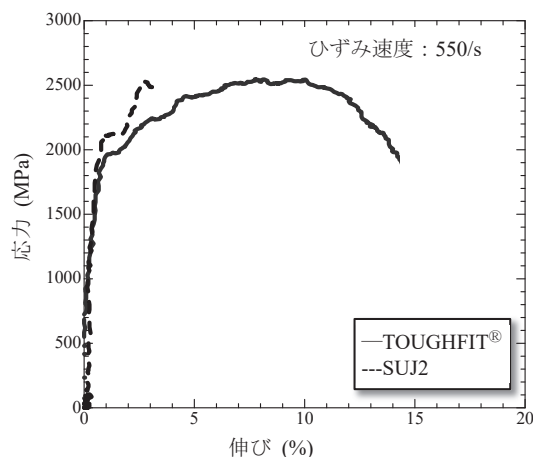


図6 高速引張試験における荷重変位曲線

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)	伸び (%)	絞り (%)
TOUGHFIT®	2520	14.7	18.5
SUJ2	2540	2.8	0

550/sの高速引張試験にてTOUGHFIT®の延性を評価した。その結果を図6および表2に示す。

代表的な過共析鋼であるSUJ2は、約2500 MPa級の高い引張強さを示すものの、伸びは約3 %にとどまり、明瞭なネッキングは認められない。一方、TOUGHFIT®はSUJ2と同等の2500 MPa級の高い引張強さを維持しつつ、約15 %という大きな伸びを示した。

この伸びは、約10 %の大きな均一伸びと約5 %の不均一伸びから構成されており、破断に至る前に明瞭なネッキングがみられた。これは、一般に脆性的挙動を示す過共析鋼としては、極めて特異な機械的特性である。さらに、伸びが大きくネッキングを伴うという特性は、応力荷荷によって部品が突発的に破断するのではなく、変形を通じて破損の前兆を捉えることが可能であることを意味する。すなわち、破損前に危険箇所を検知できるという、安全係数の観点から極めて有益な特性であるといえる。

これまで、TOUGHFIT®のような高硬度と高靱性、さらに高延性を併せ持った過共析鋼は報告されておらず、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特性を有することはTOUGHFIT®の優れた特徴である。

5. 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、コマツ殿において実用化されたトンネルボーリングマシン（Tunnel Boring Machine：TBM）のカッタリング用鋼材への適用事例を紹介する。図7にTBMおよびカッタリングの概要を示す。

TBMのカッタリングは、岩盤に押し当てながら回転させることで岩盤を破碎する建設機械用部品であり、過酷な使用環境下において極めて高い耐摩耗性および耐衝撃性が要求される。そのため、従来は多量のレアメタルを添加した冷間ダイス鋼が主として使用されてきた。

本開発鋼であるTOUGHFIT®は、一般的な軸受鋼や機械構造用鋼に類似した省合金組成でありながら、従来鋼と比較して優れた硬度、耐摩耗性および耐衝撃性を有すること

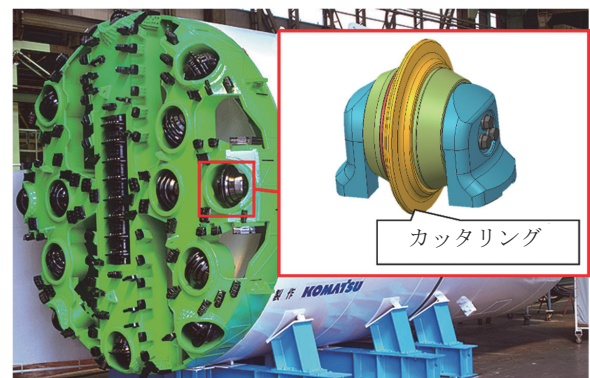


図7 TOUGHFIT®が適用されたTBMの外観とカッタリングの概要

が、各種基礎試験および実機検証を通じて確認されている。これらの特性評価結果に基づき、TOUGHFIT®はTBMカッタリング用鋼として採用されるに至った。

実際に市場に投入されたTOUGHFIT®製カッタリングを搭載したTBMは、良好な耐久性および信頼性を示し、市場における適用実績が着実に蓄積されている。

- 5) 高橋春香,常陰典正,藤松威史:山陽特殊製鋼技報,Vol.28(2021)No.1, 2-13
- 6) 山陽特殊製鋼技報, 30 (2023), 50-55

6. 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、建設機械、産業機械など、幅広い分野における軸受および駆動系部品への適用が期待されている。これらの部品は、表面硬さと芯部靱性の両立が要求されることから、従来は肌焼鋼に対する浸炭焼入れ処理が広く用いられてきた。しかしながら、浸炭焼入れは多量のCO₂を排出する硬化熱処理プロセスであるため、CN推進の観点からは、環境負荷低減を図るための代替技術が求められている。

このような背景の下、ずぶ焼入れによって高硬度と高靱性を両立可能なTOUGHFIT®は、従来の肌焼鋼に代替し得る材料として有望であると考えられる。実際に、ギヤおよびシャフトを想定した疲労特性評価においても、TOUGHFIT®は優れた疲労特性を示すことが確認されており、その有効性が報告されている⁶⁾。

7. まとめ

TOUGHFIT®は、一般にトレードオフの関係にある硬度と靱性を高水準で両立した画期的な過共析鋼である。60 HRCという高硬度を有しながら、SUJ2と比較して10倍以上の靱性を示すとともに、優れた延性を示す特徴として大きな均一伸びおよび明瞭なネッキング挙動を発現するなど、従来の過共析鋼の概念を大きく超える革新的な機械的特性を有した鋼である。

TOUGHFIT®はすでに量産化されており、浸炭処理の省略や部品の小型・軽量化を可能とするエコプロダクトとして需要家から好評を得ている。今後、環境負荷低減および高信頼性が求められる各種機械部品への適用拡大が期待される。

参考文献

- 1) 杉本隼之,山本幸治,萩原幸司,徳永透子,南埜宜俊:あたりあ 64,2 (2025),117-119.
- 2) 南埜宜俊,萩原幸司,山本幸治,杉本隼之:熱処理 第62号 第3号 (2022) 79-87.
- 3) 特許第7223997号 公報
- 4) 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,Vol.26(2019)No1, 36-42.