



高硬度高靱性過共析鋼の靱性に及ぼす焼入温度の影響

Effects of Quenching Temperature on Toughness of the High Hardness and High Toughness Hypereutectoid Steel

高橋 春香*¹ 常陰 典正*² 藤松 威史*³

TAKAHASHI Haruka, TSUNEKAGE Norimasa and FUJIMATSU Takeshi

Synopsis: By applying the newly-developed FM(Full Martensite) treatment, which has potential to provide high hardness and high toughness to hypereutectoid steel, the optimized steel shows 55HRC or more and 250 J/cm² or more with 10R-C notch.

Impact property of the steel was greatly affected by the amount of VC precipitates that comes from quenching temperature in the FM treatment.

It was clarified that controlling VC precipitates was crucial for maximizing characteristics of the FM-treated steel.

Keywords: hypereutectoid steel; high hardness; high toughness; VC.

1. 緒言

昨今、CO₂削減ニーズに代表されるように環境負荷低減への動きはますます活発になっている。CO₂排出に関し、近年、環境省が提唱するサプライチェーン排出量という考え方が普及しつつある¹⁾。サプライチェーン排出量とは、事業活動に関係するあらゆる排出を合計したCO₂排出量を指し、Scope1：「事業者自らによる温室効果ガスの直接排出(燃料の燃焼、工業プロセス)」、Scope2：「他社から供給された電気、熱、蒸気の使用に伴う間接排出」、Scope3：「Scope1、Scope2以外の間接排出(製品の使用、廃棄など)」の3つの項目を合計したものである。このサプライチェーン排出量という考え方の台頭により、ライフサイクルアセスメント(LCA)、すなわち、原料調達、製造、物流、販売、廃棄といった一連のライフサイクル全体における環境負荷を定量的に考慮しようとする動きが強まっている。この考え方にに基づき、近年の工業製品の開発においては、Scope3に関して従来鋼よりも省合金となる鋼の使用や開発が考慮されるようになり、さらにユーザーの部品の製造プロセスにおける工程負荷の低減、工程簡略化(Scope1、2の区分に相当)への寄与も重視されつつある。その一方で、工業製品における使用環境の多種多様化、更なる過酷化、燃費向上を目的とした小型軽量化のニーズは根強く、種々の部品に対する高強度化や長寿命化の要求は従来に増して厳しくなっている。ただし、従来

鋼を使用してさらに高強度化しようとする、応力集中を緩和する複雑な部品設計や高価な表面処理の実施等に頼らざるを得ず、工程負荷やコストの増加、それに伴うCO₂排出量の増加が問題となる。

例えば、表面硬さとともに靱性が要求される部品については、肌焼鋼に対し、代表的な表面硬化処理である浸炭焼入れを施した部品が多く用いられている。肌焼鋼とは、炭素含有量が0.25 mass%以下の低炭素合金鋼であり、代表的なものとしてJIS規格鋼のSCM420が挙げられる。肌焼鋼製部品に対して前記処理を行うことにより、部品表面は浸炭焼入れにより高い硬さが得られる一方で、内部は浸炭されず炭素量が低いままであるために焼入れ後も部品の芯部では高い靱性が保たれる。ただし、部品の大きさや設計仕様に応じた浸炭硬化層深さを得るためにはさまざまな浸炭パターンで処理する必要があり、そのパターンを多く持つ必要があること、また浸炭の処理時間が長いことがあり、工程負荷の高い熱処理となっている。また、とりわけ昨今の環境問題に対する懸念から生産工程におけるCO₂削減要求は高まっており、浸炭レス化あるいは浸炭時間の短縮が強く求められている。

これに対して、浸炭焼入れのような煩雑な表面処理を必要とせずに高硬度が得られる鋼として、過共析鋼が挙げられる。過共析鋼は共析組成以上の炭素(C)を含む鋼を指し、代表的な過共析鋼としてはJIS規格鋼の高炭素クロム軸受鋼SUI2が広く知られている。この鋼は、スルーハー

*1 技術企画管理部 軸受・構造用鋼グループ

*2 研究・開発センター 新商品・技術開発室 商品開発1グループ長

*3 研究・開発センター 基盤研究室長

ド（ずぶ焼きとも称する）により全体を硬化して用いられ、一般的な硬化熱処理条件のもとでは、数%の残留オーステナイトを含む高硬度のマルテンサイト組織から成る母相組織に直径1 μm以下程度の球状炭化物が分散した組織となる。工具鋼分野でも高硬度と高耐摩耗性への要求のもと過共析鋼が利用され、SUJ2と同様にマルテンサイト組織を母相組織とし、球状炭化物が分散したミクロ組織に調整された工具鋼（例えばJIS SKD11）が使用されている。ただし、一般的に硬さと靱性にはトレードオフの関係があり、過共析鋼は高硬度を得やすい反面、脆いという弱点を持つ。そこで、部品や工具の損壊を防止するため、硬度を下げて靱性を確保する、あるいはNi、Mo等の合金元素を添加・増量して靱性向上を図るといった方策が採られる。しかし、そのような高価かつ貴重なレアメタルの添加は、素材のコストアップにつながると同時に加工性も低下することから、素材または部品製造時の環境負荷を高める要因となりうる。

このような現状を打破し、高価なレアメタルや表面硬化処理に頼らずに硬度と靱性を高いレベルで両立できる過共析鋼を実現することができれば、工業上の適用範囲が格段に広がる事が期待される。本稿では、大阪大学殿ーコマツ殿ー当社の共同研究により開発した過共析鋼の高靱性化技術^{2,3)} および、その技術において靱性向上のキーとなる焼入温度の影響について報告する。

2. 過共析鋼の高靱性化のためのキーテクノロジー

Fig. 1に従来の過共析鋼における鋼の硬さと靱性の関係を示す。このように、硬さと靱性にはトレードオフの関係が見られる。高硬度、高耐摩耗性が要求される部品については、靱性を犠牲にしつつ、硬度を最優先とするために高C組成の過共析鋼が使用されている。この過共析鋼の弱点である低い衝撃値は、その高硬度に加えて、焼入後のミクロ組織の構成にも影響を受けている。Fig. 2にFe-C系二元平衡状態図を示す。また、Fig. 3に従来の過共析鋼および

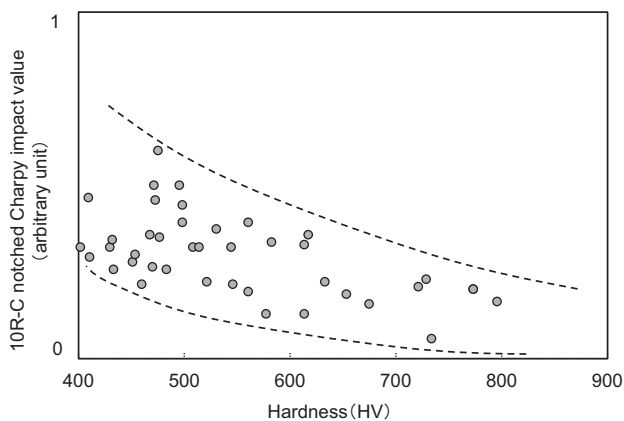


Fig.1 Relationship between hardness and Charpy impact value.

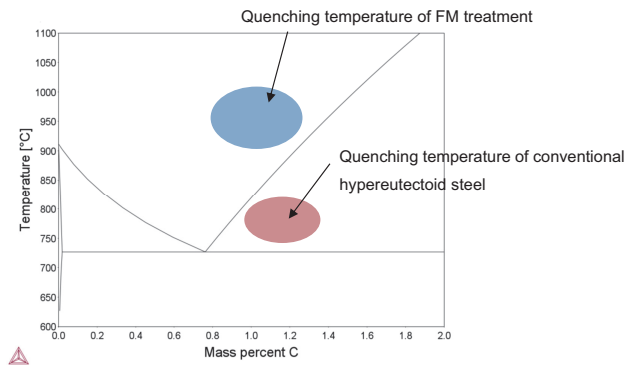


Fig. 2 Equilibrium phase diagram of Fe-C.

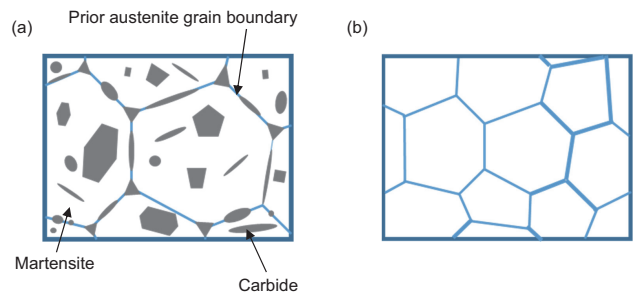


Fig. 3 Schematic microstructure illustrations of hypereutectoid steel after (a) Conventional quenching and tempering, (b) FM treatment.

び本稿で紹介するFM処理鋼の焼入後ミクロ組織の模式図を示す。従来の過共析鋼は、一般的にFig. 2のFe-C系状態図上におけるオーステナイトとセメンタイトの二相域温度内で加熱保持後に焼入れが行われる。その結果、焼入れ後の組織の旧オーステナイト粒界およびその粒内に粗大なセメンタイトが形成される(Fig. 3-(a))。このセメンタイトが、粒界破壊（旧オーステナイト粒界に沿った割れ）やへき開破壊（結晶のへき開面に沿った割れ）といった脆性破壊を助長することが、過共析鋼の衝撃値が低い主な原因となっている。したがって、粒界セメンタイトを消失させることができれば、衝撃値の飛躍的な向上が期待できる。しかしながら、粗大なセメンタイトを消失させるべく、単純に焼入温度を上昇させると新たな問題が浮上する。それは、結晶粒の粗大化である。結晶粒の粗大化は、粒界の脆化を助長し、衝撃値の低下を引き起こす。したがって、従来の過共析鋼において、硬さと靱性を両立させることは非常に困難となっていた。

以上の問題点を打開すべく、硬さと靱性の両立が可能な従来には無い優れた熱処理技術として、FM (Full Martensite) 処理が開発されている³⁾。FM処理とは、過共析鋼におけるミクロオーダーの炭化物の消失と結晶粒微細化の両立を靱性向上のキーテクノロジーとする熱処理技術である。過共析鋼において一般的な二相域からの焼入れではなく、FM処理ではオーステナイト単相域からの高温焼入れを行うとともに、それを適用する鋼にピンニン

グ粒子形成元素であるVを添加しておくことにより、Fig. 3-(b)に示すように焼入後の組織において粗大なセメンタイトを消失させつつV系炭化物（VC）のピンニング作用で結晶粒を微細化させる。これにより粗大なセメンタイトや粗大な結晶粒の影響が排除されることで、破壊のモードが脆性破壊から高靱性が得られる延性破壊へと変化する。以上の高温焼入れ、V添加を通じて従来の過共析鋼では困難であった高硬度と高靱性の両立が実現される。

ここで、FM処理では、焼入れの加熱保持温度で固溶せずに析出状態で留まるVCを結晶粒界のピンニングに利用するため、その機械的特性はVC析出量に関わる焼入温度の影響を強く受けることが考えられる。そこで本稿では、FM処理において優れた機械的特性を得るための条件として焼入温度に注目し、その影響について調査を行った。

3. 実験方法

本稿における供試材の成分をTable 1に示す。Steel Aは過共析組成のC量とFM処理における高硬度高靱性化効果を得るために不可欠なVを含有し、また、焼入性の確保のためにCr、Moを含有している。このSteel Aについて、FM処理における靱性向上のキーであるV添加量を変化させた5種類の鋼を準備した。また、過共析鋼として一般に用いられているSUJ2を比較鋼として選定し、SUJ2とSteel A（5種類）を合わせた計6鋼種について、以下のように靱性評価のための試験片の作製を行った。

まず、Steel Aについて、真空溶解により100 kg鋼塊を溶製し、それらを1150℃で4時間保持後にφ32 mmに鍛伸を行った。鍛伸後には徐冷を行った。その後、鋼材の中周部をシャルピー衝撃試験片に粗加工した。この時、試験片の長手方向が鋼材の鍛伸方向と一致するようにした。こ

の粗加工状態の試験片に対してFig. 4に示す熱処理パターンに従い、まずカンタル炉にて1000℃で15分保持した後、600℃に加熱した炉に移し替え、600℃で3時間保持することでパーライト化し、その後空冷にて室温まで冷却する熱処理を施した。この熱処理（固溶化熱処理）は、鍛伸後の冷却時に生成する粒界のネット状炭化物（靱性を損なう）を再固溶させることや、焼入加熱の際の結晶粒界ピンニングに利用するためにVCを一旦固溶させることを目的としている。続いて、固溶化熱処理材についてFig. 4の通り、810℃の加熱保持とそれに続く670℃への降温後保持を繰り返したのち、室温まで空冷する熱処理を施した。その後、FM処理としてオーステナイト単相域となる高温からの焼入れを行い、引き続き150℃と220℃にて低温焼戻しを実施した。続いて、10R-Cノッチシャルピー衝撃試験片に仕上げ加工を行った。なお、上述したように、FM処理は焼入れ後にも残存するVCをピンニング粒子として活用することで結晶粒を微細に制御し、高レベルの硬さと衝撃値を得ることができる熱処理技術である。したがって、その衝撃値は、V添加量と並んでVC析出量に関与する焼入温度の影響を強く受けるとみて、FM処理の焼入温度を900℃、950℃、1000℃の3条件として影響の確認を行った。

比較材のSUJ2はSteel Aと同様に100 kg鋼塊の溶製とφ32 mmへの鍛伸を行った。その後、球状化焼なましを実施したのち、上記と同様にシャルピー衝撃試験片の粗加工を行った。このシャルピー衝撃試験片の粗加工品に対し、一般的なSUJ2鋼の熱処理条件として840℃からの焼入れ、および180℃での焼戻しを施してから、10R-Cノッチシャルピー衝撃試験片に仕上げた。

続いて、以上のように作製した試験片についてシャルピー衝撃試験を実施した。試験は、米倉製作所製計装化

Table 1 Chemical composition of steels used in this study (mass%)

	C	Si	Mn	Cr	Mo	V
Steel A	Developed high strength steel. (Cr, Mo addition, Ni free)					0.20~0.40
SUJ2	1.00	0.26	0.40	1.35	0.04	-

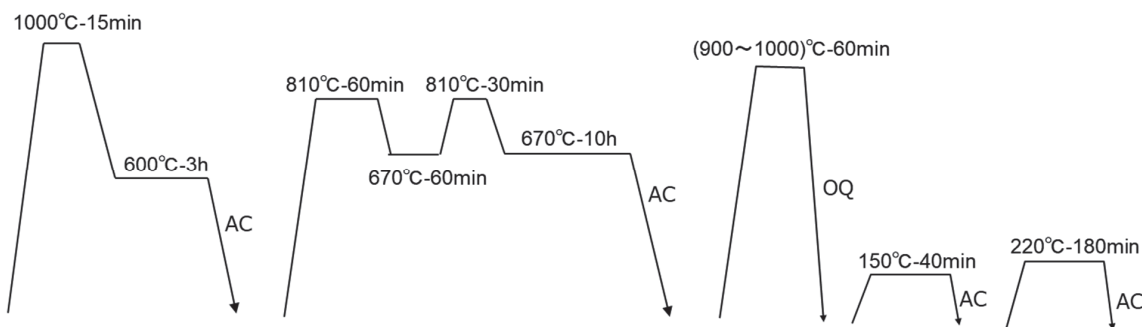


Fig. 4 Heat pattern of FM treatment.

シャルピー衝撃試験機 CHARPAC-50Cを用いて常温で行った。また、各水準の試験片から1本ずつを選定し、その破断面を日本電子株式会社製の走査型電子顕微鏡(SEM) JSM-6490を用いて観察した。観察は破壊起点部近傍で行った。また、旧オーステナイト結晶粒度観察のため、各水準において破断面観察にて選定した試験片と同じ試験片を使用し、そこから採取した試料の断面を鏡面研磨し、さらに研磨によるひずみの除去のためコロイダルシリカ溶液による仕上げ研磨を行った。この試料に対してEBSD測定を行い、マルテンサイトに関する結晶方位データを取得した。続いて、マルテンサイトとオーステナイトの結晶学的方位関係を利用してマルテンサイト変態前の元のオーステナイト方位を求めるMiyamotoらの手法^{4,5)}を活用し、それを組み込んだ解析プログラムを用いて、測定したマルテンサイトの結晶方位データから旧オーステナイト粒を再構築した。この再構築された旧オーステナイト粒径に対し、JIS G 0551の方法に基づき結晶粒度番号を算出した。算出された結晶粒度番号は、焼入れによるマルテンサイト変態前の結晶粒の微細度合いを表す指標として用いた。また、焼入時のVCの析出量については、統合型熱力学計算ソフトウェアThermo-Calcを使用し、各供試材の成分と焼入温度をもとに算出した。

4. 結果

4.1 FM処理材の高靱性化効果の検証

Fig. 5にSUJ2の焼入焼戻し材、およびSteel AのFM処理材のシャルピー衝撃試験結果を示す。なお、Fig. 5中に同試験片のロックウェル硬さを併せて示す。Steel AのFM処理材は、55HRC以上の高硬度を有しながら、250 J/cm²以上の非常に高い衝撃値を示し、SUJ2焼入焼戻し材と比較して、硬さ低下の影響を考慮しても、その衝撃値は飛躍的に向上した。

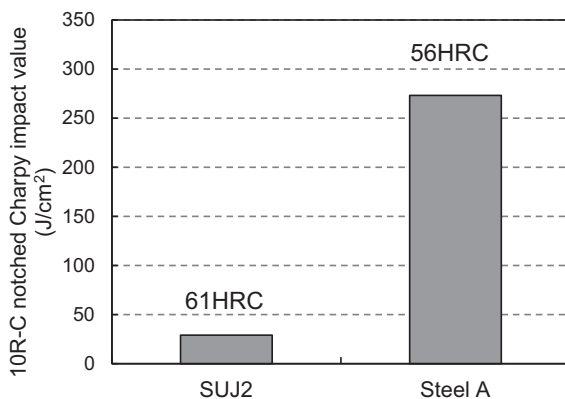


Fig. 5 Charpy impact value at ambient temperature; (a) Conventional quenched and tempered SUJ2. (b) FM-treated Steel A.

Fig. 6にシャルピー衝撃試験時の荷重-変位曲線を示す。SUJ2に比べて、FM処理を施したSteel Aは破断時の荷重が高だけでなく、破断に至るまでの変位が顕著に大きく、延性破壊的な挙動を示した。また、Fig. 7にシャルピー衝撃試験後の起点部近傍の破面をSEM観察した結果を示す。SUJ2の破壊起点部は粒界破面を伴う脆性破壊であったのに対し、Steel AのFM処理材は延性破壊であることを示すディンプル破面を呈した。

このように、Steel Aに高硬度高靱性化のためのFM処理を施すことにより、狙い通り、過共析鋼の特長である高硬度と従来過共析鋼では得られないような非常に高い靱性と両立が達成された。

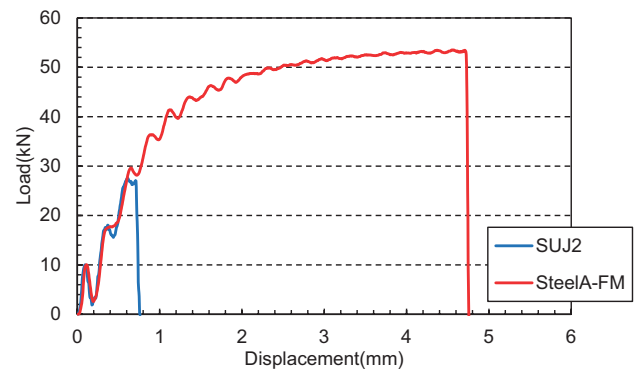


Fig. 6 Load-Displacement curves obtained by Charpy test.

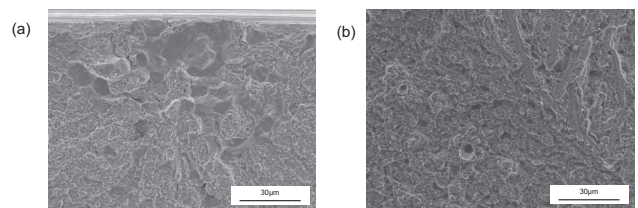


Fig. 7 SEM images of the fracture origin of 10R-C notched test pieces after Charpy impact test.

- (a) Conventional quenched and tempered SUJ2.
(b) FM-treated Steel A.

4.2 FM処理材の衝撃値に対する焼入温度の影響評価

V量を変更したSteel Aのシャルピー衝撃試験結果をFig. 8に示す。なお、FM処理材の衝撃値に対する焼入温度の影響(900℃、950℃、1000℃の3条件)についても同図に示した。また、同試験片について測定したロックウェル硬さ測定結果をFig. 9に示す。

Steel AのFM処理材は、V添加量およびFM処理時の焼入温度の違いによらず、約56HRCの同程度の焼入焼戻し硬さを示した。ただし、その衝撃値は、硬さが同等であるにも関わらず、焼入温度に応じて挙動が大きく変化した。

焼入温度が900℃および950℃の場合は、V添加量の低減とともに衝撃値が上昇する傾向が見られた。900℃焼入材については、V添加量が0.4 mass%の場合にシャルピー衝撃値(10R-Cノッチ)が140 J/cm²であるのに

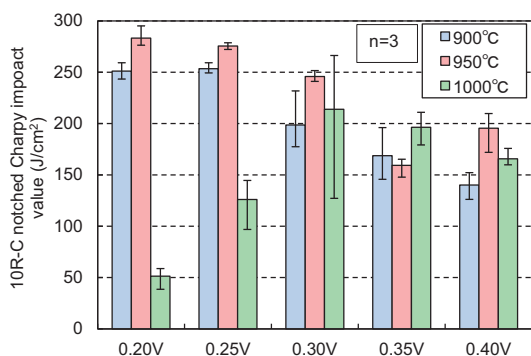


Fig. 8 Charpy impact value of specimens quenched from three quenching temperatures.

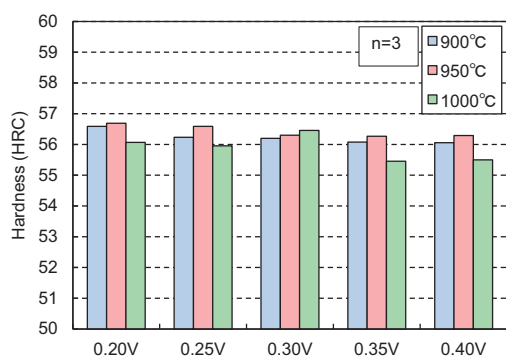


Fig. 9 Rockwell hardness of specimens quenched from three quenching temperatures.

対し、V添加量が0.2 mass%では251 J/cm²と大幅に上昇した。同様に950℃焼入材についても、0.4 mass%では195 J/cm²、0.2 mass%では283 J/cm²であり、V添加量が少ない0.2V材において250 J/cm²以上の非常に高い衝撃値が得られることが見出された。一方、焼入温度1000℃の場合はそれとは逆の傾向を示し、V添加量が0.2 mass%でシャルピー衝撃値が51 J/cm²、0.3 mass%で213 J/cm²、0.4 mass%で165 J/cm²となり、V添加量が低い場合に衝撃値が大きく低下する傾向を示した。

V添加量が多いほど、あるいは焼入温度が低いほど、焼入後に残存するVC析出量が増加し、それに伴い衝撃値は上昇するとの予想に対し、焼入温度1000℃の挙動は予想したものに近い。一方で、焼入温度900℃および950℃におけるV添加量と衝撃値の関係は予想とは反する結果となった。以降では、上記のような結果が得られた理由を考察する。

5. 衝撃値がV添加量や焼入温度の影響を受ける理由の考察

衝撃値は、硬さの低減、および結晶粒の微細化により向上することが従来から知られている。FM処理材では、Fig. 9に示した通り、焼入温度によらず硬さは同程度であるため、その衝撃値は結晶粒度の影響を強く受けると推

察された。FM処理材ではVCの量が結晶粒の大きさに関与し、VC析出量が多く、結晶粒が微細であるほど衝撃値が高くなることが考えられる。しかしながら、前述のように、900℃や950℃の比較的低温の焼入れにおいてV添加量が増加するほど（VC析出量は多くなるとみられる）、衝撃値は低下する傾向を示した。そこで、予想に反する挙動を示す理由を探るべく、FM処理材のVC析出量に着目し、衝撃値とVC析出量との関係を整理した。また、VC析出量と関連する結晶粒度の影響についても整理した。

Fig. 10にFM処理後のVC析出量と衝撃値の関係を示す。なお、VC析出量は各調査材の成分と焼入温度をもとにThermo-Calcにより算出したものを用いた。FM処理材の衝撃値は、VC析出量の増加とともに増大する傾向を示し、0.2 mass%付近で極大値を示したのち、それ以上の増加に伴い低下する傾向があることが見出された。

Fig. 11にFM処理後のマルテンサイトのEBSD測定データをもとに、焼入れ前の旧オーステナイト粒の状態を再構築した結果を示す。また、Fig. 12に再構築した旧オーステナイト粒の結晶粒度番号とVC析出量との関係を示す。FM処理材の結晶粒度は、本稿の焼入温度範囲では温度の影響をそれほど受けていないことが見出された。一方で、VC析出量と結晶粒度番号との相関は明瞭に認められた。VC析出量が最少となる0.20V-1000℃焼入材（Fig. 11(d)）は、結晶粒度番号が最小（7.6）となり、一部には部分的に粗大化した粒も見られた。それに対して結晶粒度番号はVC析出量が増加するほど大きくなり、結晶粒径としては微細になる傾向が見られた。したがって、ピンニング効果による結晶粒の微細化に対しては、VCは期待される効果を実際に発揮していることが確認された。

以上のように、VC析出量の増加によって結晶粒は微細化するため、それに伴って衝撃値は向上しても良いはずである。しかし、VC析出量が0.2 mass%以上では、結晶粒は微細化するにも関わらず、衝撃値はむしろ低下している。その理由をシャルピー衝撃試験後の破面観察に基づき考察した。

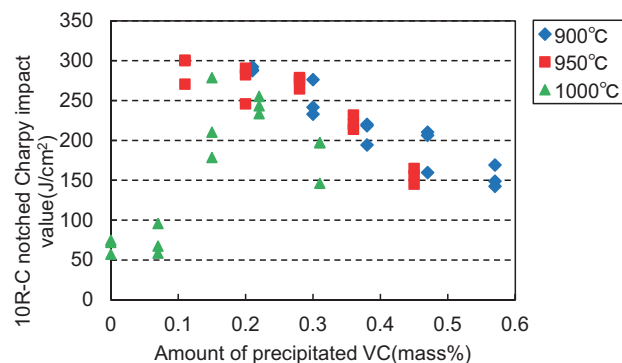


Fig. 10 Relationship between amount of precipitated VC and Charpy impact value.

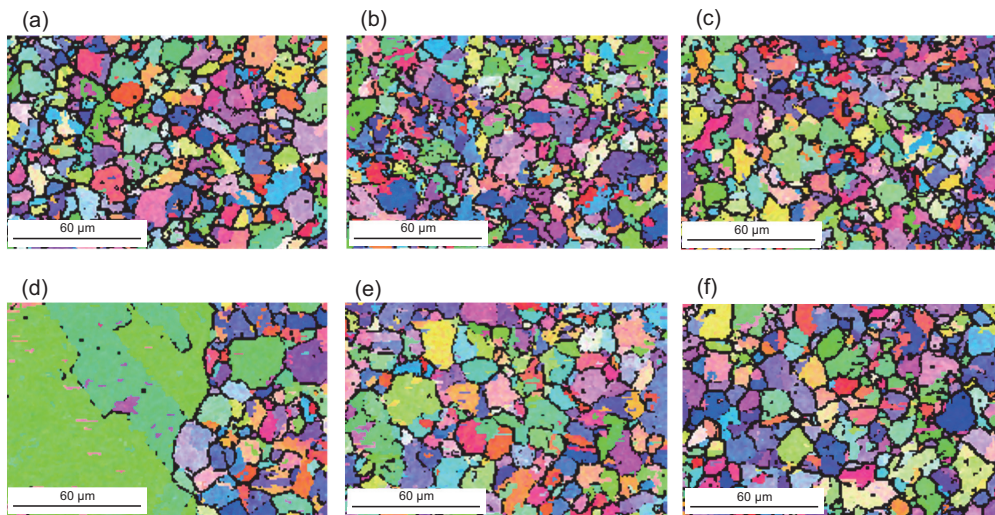


Fig. 11 Reconstructed austenite grain structure, which show the prior state to quenching.
(a)0.20V-900°C (b)0.30V-900°C (c)0.40V-900°C (d)0.20V-1000°C (e)0.30V-1000°C (f)0.40V-1000°C

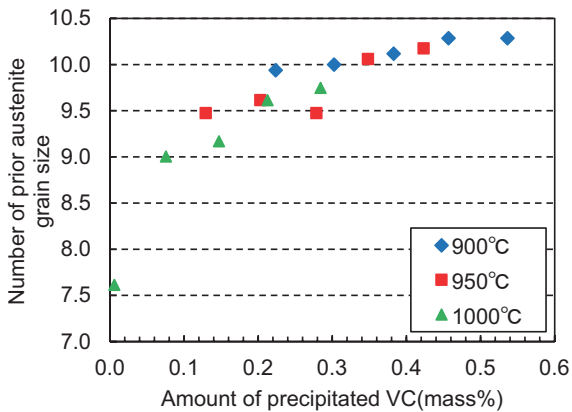


Fig. 12 Relationship between amount of precipitated VC and number of prior austenite grain size.

Fig. 13にFM処理材の破面について、起点部近傍をSEMで観察した結果を示す。まず、VCがほとんど存在せず、衝撃値が低い0.20V-1000°C焼入材の破面は擬へき開破面を呈しており、脆性破壊であったことが分かった。また、衝撃値が極大を示すVC析出量(0.2 mass%付近)となる0.25V-950°C焼入材は、微細なディンプル破面を呈し、高靱性に見合う延性破面を呈していた。そこからさらにVC析出量を増加させ、0.57 mass%とした0.40V-900°C焼入材では、破面形態がディンプル破面と擬へき

開破面(粒内での脆性破壊破面)が混在した破面へと変化し、脆性破面の比率が増加していることが分かった。したがって、VC析出量が0.2 mass%から過剰となることでシャルピー衝撃値が低下した要因として、過剰なVCの存在自体が粒内の脆化を助長した可能性が考えられる。この脆化機構については現時点では推定に留まっており、今後の詳細な確認が必要である。少なくとも本稿の結果からみて、FM処理で安定的に高靱性を得るためには適切なVC析出量に制御する必要があることが見出せる。

6. 結言

本稿において、FM処理と称する新たに開発した過共析鋼の高靱性化技術を用いることにより非常に高いレベルで硬さと靱性の両立が可能となることを示した。紹介した事例では、成分を適正化した鋼にFM処理を施すことで、硬さ55HRC以上で衝撃値250 J/cm²以上を達成している。このFM処理による高靱性化に対しては、V系炭化物(VC)の析出量が強く影響を及ぼしており、焼入温度の調整を通じてVCを過不足なく析出させている場合に最良のシャルピー衝撃値が得られることを見出した。VCの適正析出量については、実験とシミュレーション(熱力学計算

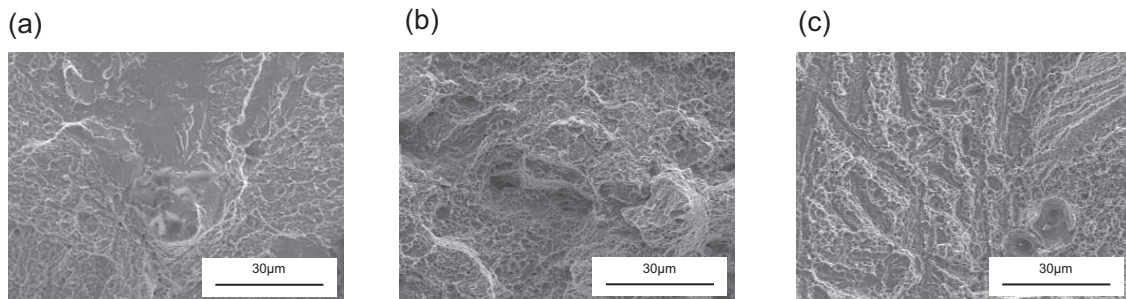


Fig. 13 SEM images of fracture origin of 10R-C notched test pieces after Charpy impact test.
(a)0.20V-1000°C (b)0.25V-950°C (c)0.40V-900°C

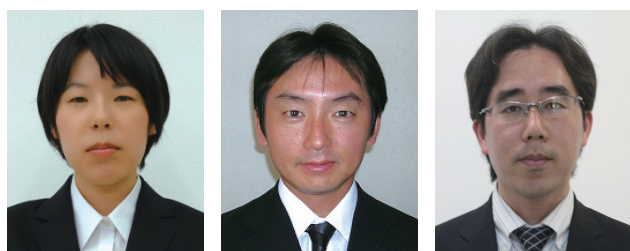
ソフトウェアによる)との対比のもと明らかにしており、その知見は鋼種特性を最大限に引き出すためのFM処理のパターンや、そこに至るまでの工程を設計する上で大いに役立つものとなっている。

本開発技術により得られる高硬度高靱性鋼の特長を活かすことで、熱処理の簡略化・CO₂排出量の削減(浸炭焼入部品のスルーハード化等)や小型・軽量化への寄与を通じたエコプロダクトの実現への貢献が期待されるとともに、これまで過共析鋼が使用されていなかった分野での利用創出による市場の拡大にも期待ができる。

参考文献

- 1) 環境省, 「サプライチェーン排出量算定の考え方」(2017年11月), http://www.env.go.jp/earth/ondanka/supply_chain/gvc/files/tools/supply_chain_201711_all.pdf, (accessed 2021-05-25).
- 2) 平塚悠輔, 山本幸治, 南埜宜俊: 山陽特殊製鋼技報, 24(2017)1, 52.
- 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)1, 2.
- 4) G.Miyamoto, N.Iwata, N.Takayama and T.Furuhara: Acta. Mater., 58 (2010), 6393.
- 5) G.Miyamoto, N.Iwata, N.Takayama and T.Furuhara: ISIJ Int., 51 (2011)7, 1174.

■著者



高橋 春香

常陰 典正

藤松 威史