

低熱処理変形高強度肌焼鋼 ECOMAX4 の開発

藤松 威史¹⁾ 丸山 貴史²⁾ 中崎 盛彦³⁾

1. はじめに

大量生産されるシャフトやギヤにおいて、熱処理時の変形抑制が重要課題となっている。これは、変形後の矯正のためのリードタイム増加や加工不良の発生、あるいは部品駆動時の騒音・振動といった悪影響を回避するためである。

熱処理変形抑制のため、焼入れ鋼材の芯部に軟質フェライト相を析出させて熱処理歪みを軽減する方法⁽¹⁾、油焼入れではなく加圧ガス冷却を利用する方法⁽²⁾、被冷却物と冷媒の間の熱伝達係数を促進あるいは低減する手段を用いて被冷却物の均一冷却化を図る方法⁽³⁾等が提案されている。これらの方法では、部品内部に軟質相が導入されることや、熱処理炉の変更が必要なこと、あるいは個々の部品に対する処置が必要なことから、汎用的な手段とはなりにくかった。

熱処理変形の解決方法は、焼入れ時の部品部位間の冷却速度差を可能な限り小さくする、すなわち均一冷却を行うことにはほぼ集約される。これは熱処理変形に強く影響する相変態のタイミングを部品部位間で合わせることに他ならない。その実現にあたり、当社では冷却方法をコントロールするという従来発想から転換し、適切な合金成分設計を行うことで焼入れ中の相変態段階での部品各部位の温度差が小さくなるようにするという新発想に基づく熱処理変形軽減を追求し、低熱処理変形高強度肌焼鋼 ECOMAX4 を開発した。以下では、開発のポイントと代表特性について紹介する。

2. 開発のポイント

(1) 熱処理変形の軽減

熱処理変形軽減のための適正な相変態温度域を見出すにあたり、冷媒(焼入油)の特性に注目した。図1に鋼材の油焼入

れ時の冷却曲線を模式的に示す。高温側から冷媒の蒸気膜段階、沸騰段階、対流段階の各過程を経由して物体の冷却が進行する。この過程に照らし、母材のC含有量が約0.2%の肌焼鋼において浸炭後に油焼入れする際の主たる相変態は、上記過程における沸騰段階終了付近から対流段階にかけての温度領域で進行すると考えられる。このとき部品部位間の温度差は沸騰段階(冷却速度大)では大きく、対流段階(冷却速度小)付近ではその差が縮まると考えられる。この着想をもとに部品の冷却が均一化されやすい対流段階付近の温度域で主たる相変態が進行するように鋼の変態点を低温側に調整するという新たな熱処理変形抑制方法を想起するに至った。

図2は従来研究⁽⁴⁾を参考にしつつ、実際のシャフト部品における質量効果の影響を加味してサイズアップを図ったキー溝付き鋼軸試験片(直径20mm、長さ200mm)である⁽⁵⁾。側面の一方にキー溝を設けることで熱処理変形の主要因であ

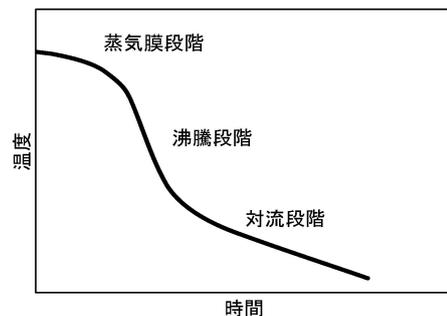


図1 油冷における冷却曲線の模式図。

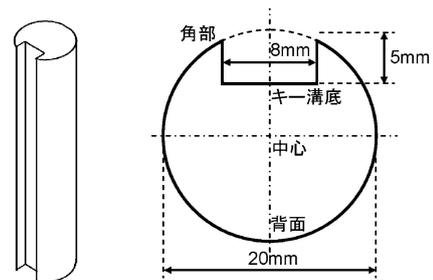


図2 キー溝付鋼軸試験片(直径20×200 L)の形状、寸法。

* 山陽特殊製鋼(株) 研究・開発センター 軸受・構造用鋼グループ: 1)主任研究員 2)研究員 3)加工プロセスグループ 主任研究員
Development of High Strength Carburizing Steel, ECOMAX4, with Improved Heat Treatment Distortion and Dimensional Change; Takeshi Fujimatsu*, Takashi Maruyama*, Morihiko Nakasaki* (SANYO SPECIAL STEEL CO., LTD.)
2016年11月9日受理[doi:10.2320/materia.56.79]

る不均一冷却が助長され、焼き曲がりを意図的に発生させることができる。対流段階に近い低温域で急冷時変態を開始させることの効能を確かめるため、汎用肌焼鋼の SCr420 とそれに対して変態点が大幅に低い熱間工具鋼 SKD61 のキー溝付鋼軸試験片(図2)を作製し、同試験片を垂直に吊り下げた状態で浸炭を想定した加熱(一段目は930℃、続く2段目は850℃)を加えたのち、吊った状態のままで静置油(1種2号油)に焼入れした。図3(a)⁽⁵⁾は焼入れ後の長さ中央部の振れ量(この半分が曲り量に相当)である。SKD61はSCr420に比べて曲りが大きく改善し、変態点低温化の有効性が示された。この曲がりの傾向は、両鋼種の変態挙動や物性を反映したシミュレーションでも良く再現された(図3(b)⁽⁵⁾)。詳細解析(図4⁽⁵⁾)からマルテンサイト変態が焼入油の緩冷却域で起こるSKD61では、キー溝側の塑性ひずみ挙動が変態ひずみに影響されにくいことを見出した。対するSCr420ではキー溝側のマルテンサイト変態によってSKD61の場合とは塑性ひずみ挙動が変化し、それが焼き曲がりを助長することが分かった。さらに焼入性の観点も考慮に入れるため、キー溝付鋼軸試験片を利用したさらなる検証実験(検証鋼成分とその特性は表1, 2⁽⁵⁾)を上記同様手法で行い、軸状部品の熱処理変形支配因子を明らかにした。熱処理変形には急冷時、本検討においては30℃/s冷却における主相(マルテンサイトやベイナイト)の変態点、および焼入性が強く関与する。焼き曲がりは変態点低下により改善し(図5(a))、焼入れ前後の長さ変化はジョミニー水冷端硬さ $J_{1.5}$ で規格化した焼入性指標 $J_9/J_{1.5}$ が0.8付近のときに小さいことを発見した(図5(b))。ECOMAX4は、これらの知見をもとに変態点低温化のためのC増量、および適正な焼入性(図6)の付与のための合金設

計を行っており、汎用高強度鋼に比べて焼き曲がり、寸法変化ともに優れた特性を示す(図7⁽⁶⁾)。

(2) 耐結晶粒粗大化特性

ECOMAX4は耐結晶粒粗大化特性が良好である。特に冷間鍛造品を浸炭するプロセスにおいて優れた性能を発揮する。冷間鍛造は熱間鍛造に比べて成形精度が高く、取り代削減等による材料歩留り改善が期待できること、加熱省略によりCO₂排出が抑制されること等、多くの利点を持つ。その反面、冷間鍛造によるせん断ひずみを残したまま浸炭を行うとその加熱過程で微細な再結晶が起こり、それを經由することでオーステナイト粒が微細化して浸炭中に結晶粒が粗大化しやすい⁽⁷⁾という課題がある。汎用鋼の場合、結晶粒粗大化抑制のために冷間加工後の焼ならしが必要になる。対して

表1 化学成分(上段：検証鋼，下段：比較用 SCr420)(mass%)

C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	Ti	Nb	B
0.16~0.25	0.22~0.52	0.28~0.82	≤0.11	1.10~2.03	≤0.05	≤0.04	0~0.04	0~0.002
0.22	0.22	0.82	0.04	1.18	0.02	—	—	—

表2 検証鋼と比較用 SCr420の急冷時変態点，ジョミニー焼入性。

種別	変態点	$J_{1.5}$	J_9	J_{11}	$J_9/J_{1.5}$	$J_{11}/J_{1.5}$
検証鋼	412~500℃	41.8~49.6 HRC	32.2~47.9 HRC	27.8~46.5 HRC	0.68~0.97	0.64~0.94
SCr420	440℃	46.8 HRC	32.2 HRC	29.8 HRC	0.69	0.64

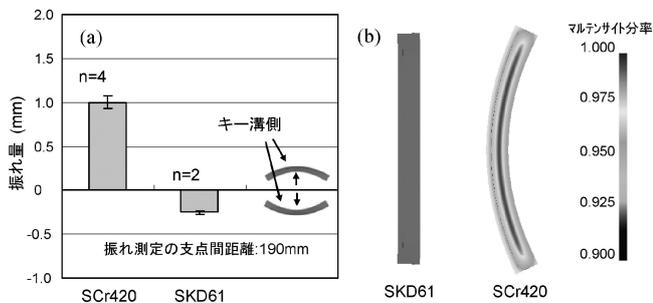


図3 (a)焼き曲がり状況と(b)シミュレーション結果⁽⁵⁾。
※(b)図は変形量を誇張表示したもの。

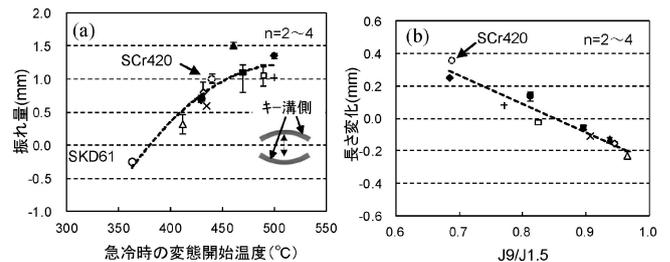


図5 検証実験結果((a)：焼き曲がり，(b)：長さ変化)。

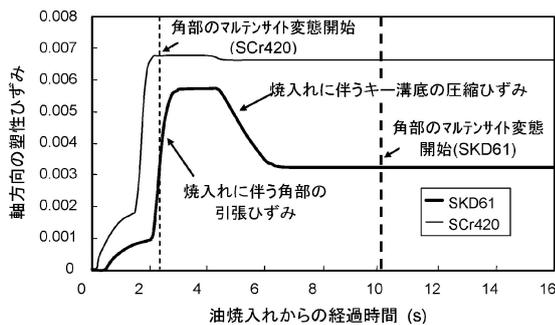


図4 油焼入れ中のキー溝試験片角部の塑性ひずみの推移⁽⁵⁾。

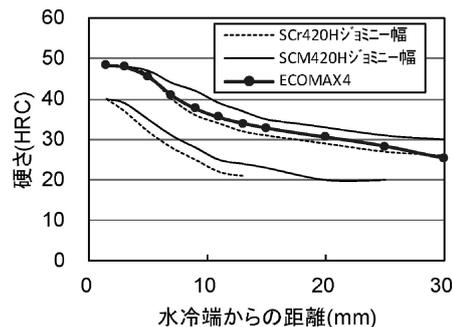


図6 ECOMAX4のジョミニー曲線の一例。

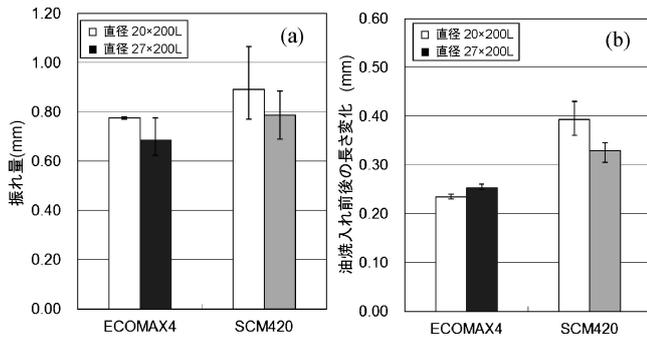


図7 キー溝付鋼軸試験片の(a)焼き曲がり, (b)長さ変化⁽⁶⁾.
※直径 27 mm 試験片のキー溝は直径 20 mm 試験片と相似形状とした.

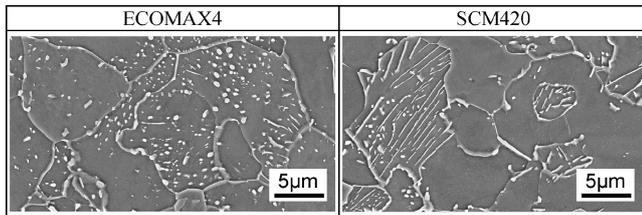


図8 軟化焼なまし後の SEM 観察結果(5%ナイトール腐食).

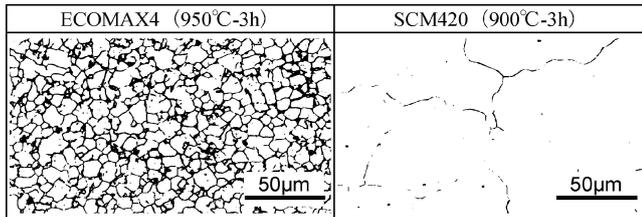


図9 70%冷間据込み材の加熱後の結晶粒粗大化状況.

ECOMAX4は二つの対策により焼ならし省略を可能とした。先ず汎用鋼に比べて結晶粒界をピン止めする微細粒子(炭・窒化物)を多量に析出させている。さらに高Cr組成とすることで冷間鍛造前工程の軟化焼なましの過程で共析反応によるラメラ炭化物の発生を抑えている⁽⁸⁾(図8)。加工時に周囲にひずみが蓄積されやすいラメラ炭化物が少ないことで、冷間加工ままでも浸炭昇温過程における過度の再結晶微細化が抑えられ、高密度分散した微細粒子の効果と相まって70%冷間加工材でも950°Cの高温浸炭に耐える(図9)。なお、ECOMAX4は汎用鋼より高C組成であるものの高Cr含有の効能で良好な炭化物球状化状態(図8左)が得られるため、冷間加工性にも優れる。

(3) 高強度の付与(耐ピッチング性の改善)

駆動系部品の主要な破損形態として歯元曲げ疲労による折損と歯面疲労による損傷(ピッチング)がある。前者はショットピーニングの適用により比較的容易に対策が可能のため、後者に対する耐久性が求められている。そこで、ECOMAX4の成分設計にあたっては特に耐ピッチング性の改善

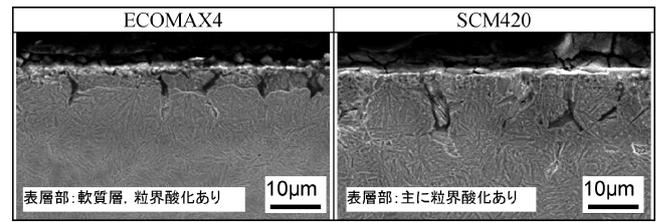


図10 ガス浸炭後の断面 SEM 観察結果(0.5%ナイトール腐食).

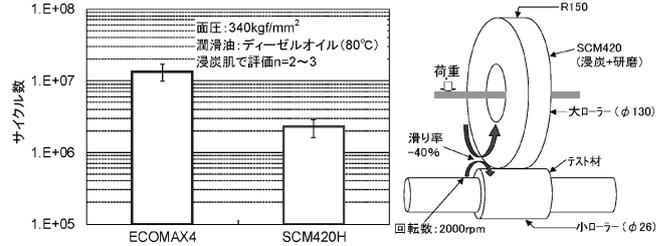


図11 ローラーピッチング試験寿命⁽⁶⁾.

を追求した。考慮すべき点として、国内ではガス浸炭焼入れ後に歯面研削を施さずに浸炭肌に近い状態でそのまま部品として使用されることが多い。そこで特にガス浸炭ままの耐ピッチング性改善に焦点を当てた。その実現のために ECOMAX4は汎用鋼に比して高Si-低Mn-高Cr組成に設計し、Moは積極添加していない。同組成の場合、ガス浸炭中の表面下数 μm 内において、合金元素が酸化反応に消費されてマトリクスから欠乏しやすくなり、続く焼入れの過程で不完全焼入れによる軟質層を表層部に形成する⁽⁹⁾(図10)。この軟質層は面疲労過程で摩滅しやすく、粒界酸化や疲労き裂が共に除去されてき裂伝ば段階に移行しにくいいため、耐ピッチング性が改善する⁽⁹⁾。浸炭まま肌状態で ECOMAX4は汎用高強度鋼比で5倍以上のピッチング寿命を実現している(図11⁽⁶⁾)。

3. まとめ

ECOMAX4は、部品の高機能化(耐ピッチング性、結晶粒度特性向上)のみならず、部品製造性に関わる熱処理変形の軽減をも実現可能な成分系を追求して生み出された高C-高Si-低Mn-高Cr系の低熱処理変形高強度肌焼鋼である。

主に浸炭ギヤ、シャフトへの適用を想定し、関連特許17件を出願済みである。既に部品量産化が開始しているなど、需要家から好評を得ており、今後も適用拡大が期待される。

文 献

- (1) 特開平9-111408号公報.
- (2) 特開2008-121064号公報.
- (3) 特開2010-174289号公報.
- (4) 有本享三, 奈良崎道治: 熱処理, **42**(2002), 346-352.
- (5) 藤松威史, 中崎盛彦: 山陽特殊製鋼技報, **21**(2014), 28-37.
- (6) 山陽特殊製鋼技報, **23**(2016), 74-78.
- (7) 藤松威史ら: 鉄と鋼, **95**(2009), 161-168.
- (8) 藤松威史ら: 鉄と鋼, **95**(2009), 169-175.
- (9) 丸山貴史ら: 山陽特殊製鋼技報, **22**(2015), 21-28.