

レアメタルレス高強度軟窒化クランクシャフトの開発

Development of Nitrocarburized High-strength Crankshaft with No Rare Metals Added

瀧谷 善弘*

Yoshihiro TAKITANI

宮崎 貴大**

Takahiro MIYAZAKI

斎藤 勇*

Isamu SAITO

神谷 啓一郎**

Keiichiro KAMIYA

要 旨

従来の軟窒化高強度クランクシャフトは、レアメタルである Mo による強化機構を活用することにより高い疲労強度を確保していた。それに対し Cu, Cr を活用し最適化した材料設計により、レアメタルを添加せずに従来材と同等の高い疲労強度を有するクランクシャフトを開発した。

Cr は軟窒化時に表層近傍の硬度を上昇させるため高強度化に有効であるが、軟窒化処理により発生するクランクシャフトの曲りを、塑性変形を与えて矯正する際にクラックが発生しやすくなるため積極的に活用するのが難しいとされていた。開発材は Cr による硬化と、Cu によるフェライト固溶強化を組み合わせ、高強度化に必要な Cr 使用量を抑制することにより曲り矯正性を改善し、レアメタルを添加せずに高い疲労強度と良好な曲り矯正性を両立した。

ABSTRACT

Conventional nitrocarburized high-strength crankshafts secure high fatigue strength through a strengthening mechanism using the rare metal molybdenum (Mo). In contrast, a crankshaft with high fatigue strength equal to that of the conventional material was developed without the addition of rare metals by using copper (Cu) and chromium (Cr) and optimizing the material design.

Cr increases the hardness near the surface layers during nitrocarburization, which effectively increases the strength. However, in this case cracking easily occurs when plastic deformation is applied to straighten crankshaft bending that occurs in the nitrocarburization process, which has made it a challenge to actively use Cr. The developed material combines hardening by Cr with ferrite solid solution strengthening by Cu, and enhances straightenability by suppressing the Cr content required for strengthening. This simultaneously achieved both high fatigue strength and good straightenability without the addition of rare metals.

1. まえがき

近年の自動車エンジンは高出力化と環境性能の相反する特性が同時に要求される。特に最近時、環境ニーズの高まりにより省燃費化が求められている。これに伴い、エンジンの構成部品であるクランクシャフトは、軽量化やクランク軸と軸受け間のしゅう動抵抗低減を目的としたクランク軸の細径化による剛性低下によりクランクシャフトへの負荷は増大する傾向にあり、高い疲労強度が要求される。クランクシャフトは一般的に熱間鍛造や鋳造で成型され、高周波焼入れやロール加工、軟窒化処理など高硬度化や残留

圧縮応力を利用して疲労強度の向上が図られる^{(1)–(5)}。

軟窒化をおこなう高強度クランクシャフトに対しては、焼ならしを前提として 0.45 mass% 以上の比較的高い炭素含有量の鋼に窒化性元素の Al や Cr を添加して硬度上昇を図る方法などがおこなわれていた。その後、焼ならしを省略しつつ高い疲労強度と曲り矯正性を確保し、さらには素材硬度を低く抑えることにより機械加工性を向上させるために、比較的低い 0.35 mass% 程度の炭素含有量の鋼にレアメタルである Mo を添加する手法が用いられている⁽⁶⁾。Mo を添加することにより、焼ならしを省略した比較的低い炭素含有量の鋼においても高い疲労強度と良好な曲り矯

* 四輪 R&D センター

** 大同特殊鋼株式会社

正性の達成が可能である。しかし一方でレアメタルは投機の対象になりやすいため価格が安定せず、また新興国における需要の拡大により供給が不安定になる可能性が予測される⁽⁷⁾。本開発では電炉製法を対象として Mo を省略する手法を検討した。

2. 開発のねらい

Honda の自動車用ガソリンエンジンに使用されるクランクシャフトは鍛造により成型し、機械加工後に軟窒化処理を施すことで疲労強度特性を向上させている。高強度材をターゲットとして以下の特性を満足するクランクシャフトを検討した。

- (1) レアメタルの添加が不要であること
- (2) 高疲労強度であること (従来高強度材同等)
- (3) 良好な曲り矯正性を有すること (従来高強度材同等)

3. 成分設計

3.1. 成分設計の考え方

曲り矯正を前提とする軟窒化クランクシャフトは軟窒化時に表層近傍の硬度を上昇させることによって曲げ疲労強度を確保している。一方で表層近傍の硬度が上昇すると曲り矯正性が低下してしまうため、曲げ疲労強度と曲り矯正性を両立させる成分設計をおこなうことが重要である。従来の高強度材はレアメタルである Mo により軟窒化時に表層近傍の硬度を適度に上昇させつつ、Mo のクラスタ生成によりフェライトを高強度化することによって高い疲労強度と良好な曲り矯正性を両立している。軟窒化により表層近傍の硬度を上げる手法としては Mo 以外に Cr, V や Al などの添加が挙げられるが、これらの元素は高強度化には有効であるが矯正性を低下させるため、曲り矯正を前提とするクランクシャフトに対し積極的に活用するのは難しいとされている⁽⁶⁾。実際に従来の高強度材と同等の 0.36 mass% の炭素量を含む鋼に Mo の代わりに表層近傍の硬度を上げる元素の一例として Cr を 0.15 mass% 添加した場合、Table 1 に示すように従来の高強度材と同等の疲労強度を達成可能であるが、矯正性が低下してしまう。この矯正性はテストピースに曲げ変形を与えた時、クラックが発生した時のひずみ値 (クラック限界ひずみ) により評価した⁽⁸⁾。このように Cr を添加し、軟窒化によって硬度を上げるだけでは従来材のように高い疲労強度と良好な曲り矯正性を両立することはできない。Cr, V や Al による高強度化の効果を活用して Mo を省略するためには、なんらかの手段で Mo のもう一つの効果であるフェライト高強度化をおこない、必要な Cr 量を抑制する必要があると考えられる。開発材はこの課題を解決する手法としてフェライト高強度化機能を他の元素によって代用し、Mo 添加を省略することを検討した。

Table 1 Bending fatigue strength and cracking limit strain of Cr added steel after nitrocarburization (Conventional steel = 100)

	Bending fatigue strength	Cracking limit strain
Cr added steel	106	51

3.2. フェライト面積率の設定

フェライトの高強度化を検討するにあたり、フェライトとパーライトからなるクランクシャフトの金属組織に占めるフェライトの面積率を設定し、その後高強度化について検討をおこなった。フェライト面積率には C と Mn の量が大きく影響するため、最初にこの 2 元素の量を設定した。曲げ疲労強度を低下させずに曲り矯正性を改善する手法として低カーボン (C) 化が有効であるとされており⁽⁶⁾、これは同じ硬度においてもフェライト面積率が多いほど曲り矯正性が良好であることを意味していると考えられる。Fig. 1 に C, Mn 量を調整し、いずれも軟窒化後の表層近傍硬度が同程度であり、フェライト面積率をそれぞれ 63.2%, 41.5%, 11.1% に調整したものについて曲り矯正性を検証した結果を示す。同程度の表層近傍硬度であっても、フェライト面積率が多いほどクラック限界ひずみ値が高く、曲げ矯正性が良好であることが確認できた。良好な曲り矯正性を得るためにはフェライト面積率を多く設定するのが有効であるが、一方でクランクシャフトにはオイルシールとの耐摩耗特性も必要とされ、C と Mn 量を必要以上に減らし、フェライト面積率が増加すると硬度が低下し耐摩耗性が課題となる。Fig. 2 に C, Mn 量の調整により内部硬度が異なるクランクシャフトを作製し、内部硬度と耐摩耗性の関係を検証した結果を示す。従来 of クランクシャフトと同等の耐摩耗性を確保するために必要な内部硬度は HV 160 以上である。Fig. 3 に C, Mn 量を調整してフェライト面積率を変化させた時の C, Mn 量とフェライト面積率の関係を示す。C, Mn 量を低減し、フェライト面積率をできるだけ多く確保したいが、フェライト面積率 70% を超える

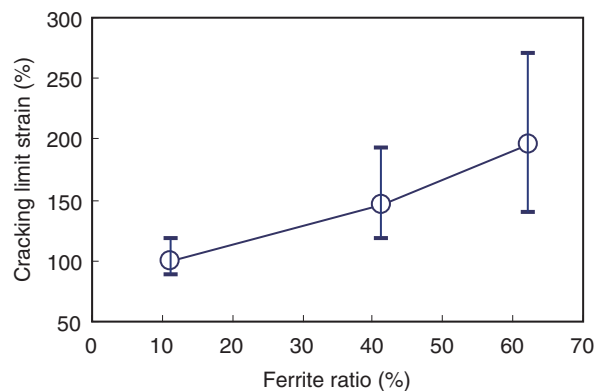


Fig. 1 Relationship between ferrite ratio and cracking limit strain (Ferrite ratio 11.1% data = 100)

と必要な硬度である HV 160 を下回ってしまう。以上を考慮しフェライト面積率を 50% から 70% と設定し、C 0.30 mass%, Mn 0.80 mass% を開発材の代表値とした。

3.3. フェライト固溶強化

Mo のフェライト高強度化効果を代替する手法として他の元素によるフェライト固溶強化の活用を検討した。これにより必要な Cr 量を抑制し曲り矯正性の改善を図った。Mo はクラスタ生成効果により表層から内部まで均一にフェライトを強化する効果を有する。よって代替する元素としては軟窒化時に窒化物等を生成し表層近傍硬度を上昇させたり、硬化層深さを抑制したりすることにより軟窒化前後の硬度変化へ影響を与えることなく、表層から内部まで均一にフェライトを高強度化する元素が望ましい。Fig. 4 は、Table 2 に示す成分をベースとして、一般的にフェライト固溶強化元素として知られている各種元素を添加した鋼について軟窒化をおこない、50 μm 深さ位置におけるベースとなる成分の鋼と各種元素を添加した鋼の硬度差をプロットしたものである。50 μm 深さ位置の硬度上昇幅は Cu や Ni の添加量に依存せず一定であり、これらは軟窒化の影響を受けずにフェライトを強化できる元素であることを示している⁽⁹⁾。Cu は Ni に対し、原料となるスクラップ材の調整により活用しやすい元素であるため、Cu と Ni は同様の効果を得られると考えられるが、Cu の活用を検討

Table 2 Chemical composition of original test steel

	C	Si	Mn	Cu	Ni	Cr
Original test steel	0.36	0.07	0.65	0.10	0.10	0.15

することとした。

Fig. 5 に、C, Mn や Cr 等の調整により、フェライト面積率 50% から 70% を前提として表層近傍の硬度を変化させた時の表層近傍の硬度と曲げ疲労強度の関係を示す。従来材と同等の曲げ疲労強度を確保するために必要な硬度は HV 300 である。Fig. 6 に Cu が 0.05 mass% 以下の含有量の場合と Cu が 0.25 mass% から 0.30 mass% 含有する場合の曲り矯正性を示す。Cu を 0.25 mass% から 0.30 mass% 含

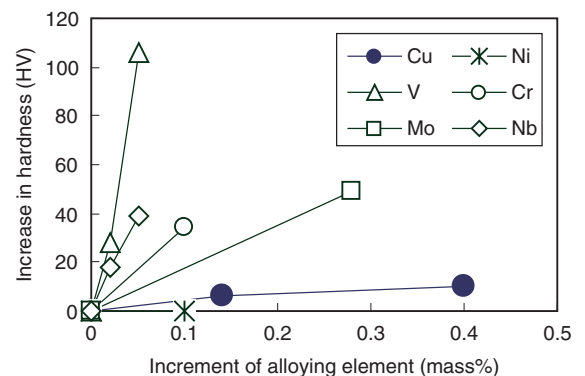


Fig. 4 Influence of alloying elements on surface hardness after nitrocarburization

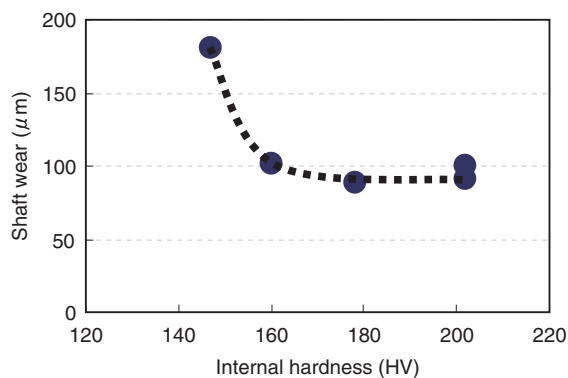


Fig. 2 Relationship between internal hardness and wear loss at oil seal section of crankshaft

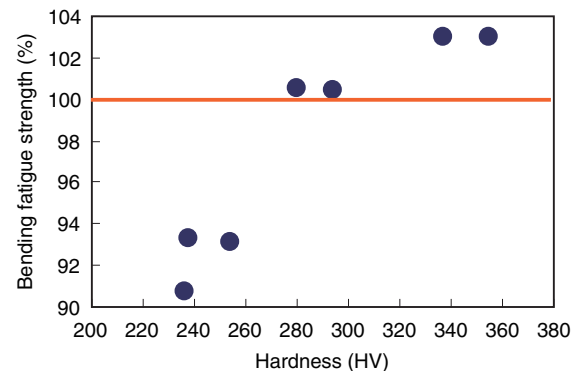


Fig. 5 Relationship between hardness and bending fatigue strength (Conventional steel = 100)

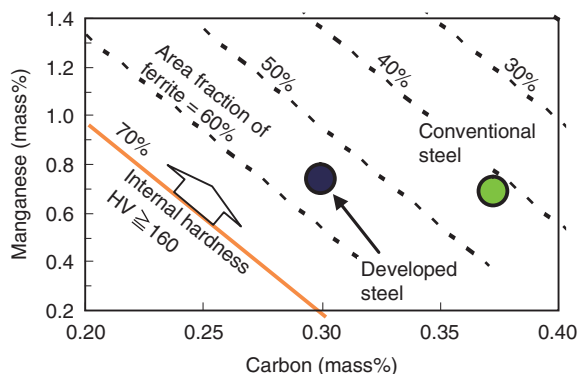


Fig. 3 Relationship between added alloying element contents and area fraction of ferrite

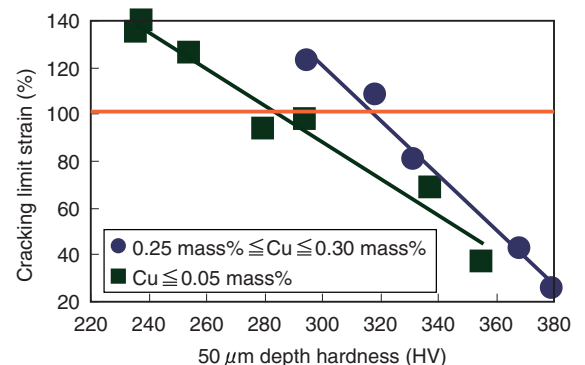


Fig. 6 Relationship between 50 μm depth hardness and cracking limit strain

む場合、同一硬度あたりの曲り矯正性が改善されており、必要な硬度 HV 300 において従来材と同等以上の曲り矯正性を確保していることがわかる。またこの Cu 成分範囲はスクラップ材の調整により添加せずに必要量を確保可能であり、0.25 mass% から 0.30 mass% の Cu を固溶強化元素として活用することとした。

3.4. 軟窒化による高強度化

軟窒化時に表層近傍の硬度を上げる元素としては Cr, V や Al⁽⁶⁾ などが挙げられるが、Cr は鋼の原料であるスクラップ材の調整により添加せずに確保可能である。Fig. 7 に Cr 量を変化させた時の軟窒化前後の表層近傍と内部それぞれの硬度変化量を示す。Cr は内部硬度への影響がほとんど無いため、鍛造性や機械加工性へ影響を与えることなく軟窒化時の表層近傍の硬度をコントロールすることが可能である。以上の理由から軟窒化時に表層近傍の硬度を上げる元素として Cr を選択した。Fig. 8 に Cu が 0.25 mass% から 0.30 mass% 含有されていることを前提とした場合の Cr 含有量と表層近傍の硬度の関係を示す。従来材と同等の曲げ疲労強度を確保するための必要硬度 HV 300 を達成するのに必要な Cr 量は 0.10 mass% 以上である。Cr が必要以上に含有すると曲り矯正性が低下するため、曲げ疲労強度と曲り矯正性の兼ね合いから Cr 0.12 mass% を開発材の代表値とした。

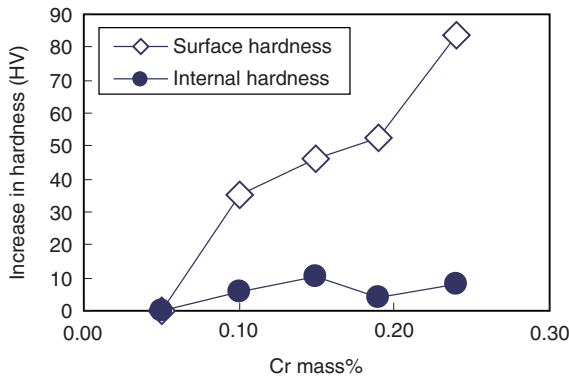


Fig. 7 Influence of Cr on surface hardness and internal hardness after nitrocarburization

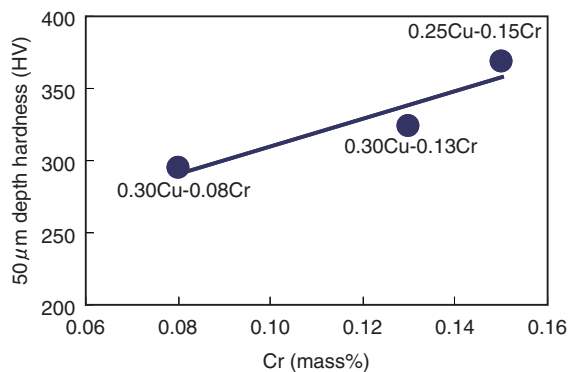


Fig. 8 Relationship between Cr mass% and 50 μm depth hardness

4. 強化機構

開発材のフェライト高強度化の機構は Cu による固溶強化である⁽⁹⁾。軟窒化による高強度化の機構は炭素鋼の場合、一般的に窒素の固溶強化であると言われているが、一方で Cr は窒化物を形成する元素として知られている⁽¹⁰⁾。開発材のように 0.10 mass% 程度の比較的少量の Cr を含む鋼における軟窒化時の強化機構が窒素の固溶強化によるものなのか、それとも窒化物の析出強化によるものなのか確認をおこなった。固溶強化の強化機構が支配的である場合、固溶する窒素濃度に応じてフェライトの格子定数が変化すると考えられる。Fig. 9 に表面より 30 μm, 100 μm, 1000 μm 深さにおいて電子線マイクロアナライザにより窒素濃度を測定し、X 線解析によりフェライトの格子定数を測定した結果を示す。格子定数は窒素濃度に依存せずほぼ一定であり、固溶強化の寄与は小さいと推定できる。次に Fig. 10 に電界放射型透過電子顕微鏡にて表層から 50 μm 深さ位置について分析した結果を示す。これにより CrN と同様の結晶構造をもつ析出物が多数確認された。Fig. 11 はこの析出物をエネルギー分散型 X 線分析にて分析した結果である。析出物は Cr を含んでおり、CrN の析出物であると考えられる。よって 0.10 mass% 程度の比較的少量の Cr を含有する鋼における軟窒化時の強化機構は、窒素の固溶強化よりも CrN による析出強化が支配的であ

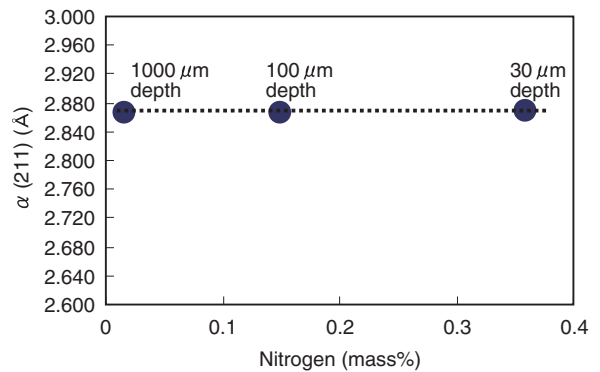


Fig. 9 Lattice constant of ferrite after nitrocarburization

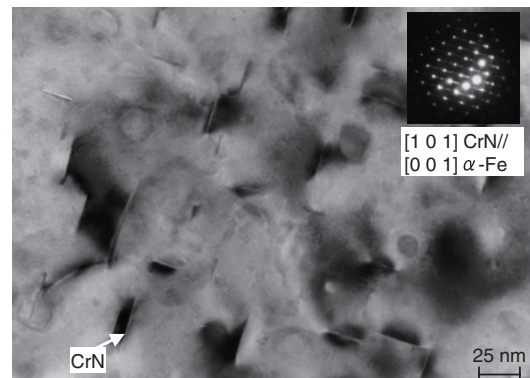


Fig. 10 Transmission electron micrograph taken from diffusion layer of steel containing 0.10 mass% Cr

Table 3 Chemical composition of developed and conventional steel in mass %

	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Mo
Developed steel	0.30	0.08	0.80	0.013	0.05	0.25	0.12	-
Conventional steel	0.37	0.20	0.82	0.015	0.05	-	-	0.16

と考えられる。Crのみで高強度化した場合、曲り矯正性を低下させる原因は、この強化機構である析出強化に因るものと考えられる。析出強化はき裂伝播エネルギーを低下させる⁽¹¹⁾ため、曲り矯正性が著しく低下する原因となると考えられるが、開発材はMoのフェライト高強度化の効果をCuで代用したことにより高強度化に必要なCr量を抑制することができ、高い疲労強度と曲り矯正性を両立することが可能になったと考えられる。

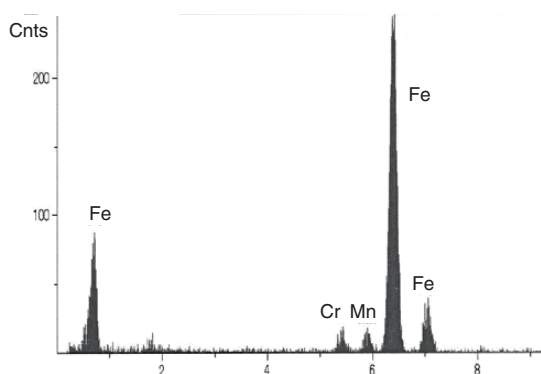


Fig. 11 Energy dispersive X-ray spectrometry analysis of precipitate

5. クランクシャフト特性

以上の検討結果より設定した代表的な材料成分値をTable 3に示す。あわせて従来高強度クランクシャフトの代表的な材料成分値も記載した。開発材は従来材に対しMoを省略しており、一方でスクラップ材の調整により確保可能な範囲のCu, Crを活用しているため、レアメタルの添加が不要な成分系となっている。次に3.5L用V6クランクシャフトを作製して断面硬度を測定し、クランクシャフト特性である曲げ疲労強度と曲り矯正性を確認した。Fig. 12に示すようにクランクシャフトの表層近傍硬度は

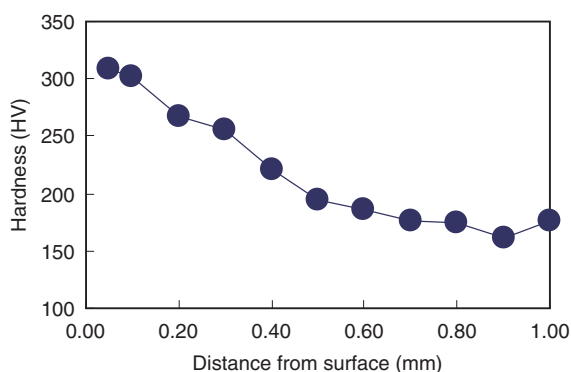


Fig. 12 Hardness profile after nitrocarburization

Table 4 Bending fatigue strength and cracking limit strain of crankshafts (Conventional high strength crankshaft = 100)

	Bending fatigue strength	Cracking limit strain
Developed steel	102	99

必要硬度HV 300を満足しており、Table 4に示すように従来のクランクシャフトと同等の曲げ疲労強度と曲げ矯正性を達成した。

6. まとめ

Cu, Crを最適化した成分設計材料を電炉製法にて作製することにより、Moを必要とせずレアメタルの添加が不要な高強度クランクシャフトを開発した。これによりコストを約2%低減し、将来的なレアメタル高騰のリスクを回避することが可能となった。本開発で以下のことが明らかになった。

- (1) Crによる軟窒化時の析出強化とCuによるフェライト固溶強化を組み合わせることにより、レアメタルを添加せずに従来の高強度材と同等の高い疲労強度と良好な曲げ矯正性を達成することが可能である。
- (2) 高強度化に必要なCu, Crは原料となるスクラップ材中に含有されており、スクラップ材の調整により必要量を確保可能である。
- (3) 0.10 mass%程度のCr量における軟窒化時の強化機構は窒素の固溶強化よりもCrNによる析出強化が支配的である。

参考文献

- (1) 岩間直樹：自動車用特殊鋼部品における最近の技術動向，自動車技術，Vol.55, No.10, p.64-68(2001)
- (2) 鈴木信一，谷健二：最近の窒化処理製品，熱処理，32巻，第5号，p.262-266(1992)
- (3) 森元秀，河本剛，張龍隆行，大脇進，岩間直樹：高疲労強度非調質鋼クランクシャフトの開発，自動車技術会学術講演会前刷集，No.47-00, p.9-12(2000)
- (4) 恩田勇人，浅井鉄也，藤木賢治，工藤洋嗣，室伏和昌：高強度高周波焼入れクランクシャフトの開発，Honda R&D Technical Review, Vol.15, No.2, p.175-182
- (5) 長坂英明，森啓之，荒木重臣，石橋保樹，濱田猛，高

- 見元彦:冷間ロール加工による一体型クランク軸の疲労強度の向上, 神戸製鋼技報, Vol.48, No.1, p.68-71(1998)
- (6) 浅井鉄也, 瀧谷善弘, 佐野直幸, 松本斉:焼準省略可能な高強度軟窒化クランクシャフトの開発, Honda R&D Technical Review, Vol.19, No.1, p.86-93
- (7) 渡辺寧:レアメタルの埋蔵量と生産量, 将来の需給展望, 自動車技術, Vol.63, No.11, p.14-18(2009)
- (8) Matsumura, Y., Kurebayashi, Y., Konagaya, D., Mizuno, K.: Development of Nitrocarburizing Steel for Crankshafts, SAE Technical Papers, 1999-01-0601(1999)
- (9) 保母誠, 高田勝典:中炭素鋼の軟窒化特性に及ぼす微量 Cu の影響, 電気製鋼, Vol.77, No1, p.29-38(2006)
- (10) 井上幸一郎, 松村康志:中炭素鋼の軟窒化特性に及ぼす合金元素の影響, 電気製鋼, Vol.75, No.1, p.11-18(2004)
- (11) 井上幸一郎, 中村貞行:フェライト・パーライト型非調質鋼の機械的性質に及ぼす C, V 量の影響, 電気製鋼, Vol.65, No1, p.22-30(1994)

■ 著 者 ■



瀧谷 善弘



斎藤 勇



宮崎 貴大



神谷啓一郎