

化合物層制御技術を用いた高強度弁ばねの開発

Development of High Fatigue Strength Valve Spring Using Control of White Layer by Nitriding

前 川 恵 一*
Keiichi MAEKAWA
鎗 田 博***
Hiroshi YARITA

村 上 敦*
Atsushi MURAKAMI
渡 辺 崇 則****
Takanori WATANABE

橋 村 雅 之**
Masayuki HASHIMURA

要 旨

材料の未固溶炭化物を低減しながら焼き戻し軟化抵抗を向上させる元素添加をおこなうことで、冷間コイリング性を維持しながら、窒化後の内部硬さの向上をはかった。弁ばねの表面処理である窒化に関しては、従来は化合物層に対する対応はおこなわず高硬度化していた。しかし、線材強度、窒化拡散層硬さ、内部硬さを極限まで高めた結果、化合物層強度が破損のヒューズとなり疲労強度が上がらないことがわかった。そこで化合物層が疲労強度に有害と考え、本来、相反する化合物層レスと窒化拡散層硬さ向上を両立する窒化方法を開発した。

ABSTRACT

Elemental addition to a material to reduce its non-dissolved carbide content while increasing its resistance to temper softening has helped to increase internal hardness after nitriding while maintaining its cold-coiling-ability. Conventionally, high strength has been achieved by applying nitriding as a surface treatment to the valve springs, without consideration of the compound layer. However, when the strength of wire coils, the hardness of the nitrogen-diffused layer, and internal hardness are maximally increased, the white layer becomes the points of origin of breakages, and fatigue strength does not increase. The white layer was therefore judged detrimental to fatigue strength, and a nitriding method was developed that attained nitriding without the white layer and the achievement of increased hardness in the nitrogen-diffused layer, which had previously been incompatible.

1. はじめに

二輪車の動弁系は、バルブリフタまたはロッカアームを介してバルブを駆動する方式が一般的で回転数は高いもので 15000 r/min を超える。弁ばねは回転上昇に伴ってサージングと呼ばれる共振現象が発生し、設計応力を超える応力増加があるため、高回転領域での使用頻度が多い二輪車では高い疲労強度の弁ばねが求められている。弁ばねを高強度化することは動弁系のコンパクト化を可能とし、エンジンや車体の軽量化へ寄与する。また高強度化に伴い弁ばねへの負荷が増えると、高速運動での高熱環境下にさらされ荷重の低下(へたり)が発生し、バルブの挙動低下につながるため、耐へたり特性も重要である。

弁ばねの高強度化には、材料の高強度化と表面処理技術の向上によるところが大きい。材料の引張強度は一般的に硬さに比例するため、材料を高硬度化する開発が進められてきた

(1), (2)。しかし高硬度は同時にじん性低下を招くため、冷間コイリング性が低下する。また高硬度化しても、表面処理である窒化により焼戻され内部硬さが低下するため焼戻し軟化抵抗の向上が必要となる。焼き戻し軟化抵抗は弁ばね特性に重要な耐へたり特性にも影響が大きい。しかし焼き戻し軟化抵抗を向上させる元素もまた、炭化物形成により冷間コイリング性を低下させる。実用化されている高強度材(SWOCN-V材)は焼戻し軟化抵抗を向上させるためVを0.4%添加し、優れた焼き戻し軟化抵抗を得ることができたがV添加による未固溶炭化物の増加で冷間コイリング性の余裕度が低下した。弁ばねの表面処理技術として窒化は、表面硬さ向上のために窒化温度を上げ窒素拡散を促進させる。しかし窒化条件により内部硬さや化合物層の厚さは変化する。これらは疲労強度に影響を及ぼすため、窒化条件の選定は非常に重要である。

本稿では、合金成分、窒化条件を中心に高強度弁ばねの開発について報告する。

* 二輪R&Dセンター

** 新日本製鐵株式会社

*** 鈴木金属工業株式会社

**** エア・ウォーター株式会社

2. 材料成分設計

2.1. 合金成分のねらい

材料の考え方として、以下の3点を設計コンセプトとし開発をおこなった。

- (1) 高強度と冷間コイルリング性を両立し、窒化性にも優れること。
- (2) 窒化温度における内部硬さ低下を防ぐため、焼き戻し軟化抵抗が高いこと。
- (3) コスト高を抑制するため、特殊処理はせず、現有設備で生産可能なこと。

2.2. 合金成分検討

高強度と冷間コイルリング性の両立する合金成分の検討をおこなった。高強度弁ばね鋼にとってVは窒化での表面硬化元素として重要であるだけでなく、窒化の加熱後も内部硬度を維持するために重要な元素である。一般にVは400–700℃の加熱により析出硬化するために、ばね鋼の窒化のように加熱処理する製品に有用である。しかし工業的に利用するには考慮すべき点も多い。添加したVが粗大な未溶解炭化物として鋼中で消費されてしまえば前述の析出硬化の効果は小さくなるばかりでなく、粗大な未固溶炭化物そのものがコイルリング性の低下を招く弊害を生じる。したがって未固溶炭化物を抑制し、弊害を抑制するとともに、弁ばね製造時の窒化処理での析出硬化や焼戻し軟化抵抗を得るために有効な固溶または微細なVを確保することが重要である。

このことはFig. 1に示すようにVを多量に添加してもその効果が飽和してしまうことから予測される。このようにV添加量は実質的な有効V量を確保するとの観点から添加するものの、むやみな過剰添加をさけ、圧延からばね製造に至る製造工程の熱履歴で有効に活用できる最大量とした。

同様に他の元素についても強度と炭化物の観点から検討した。すなわちCr炭化物は固溶しにくいいため高周波処理のような短時間熱処理には適さないと考えられている。

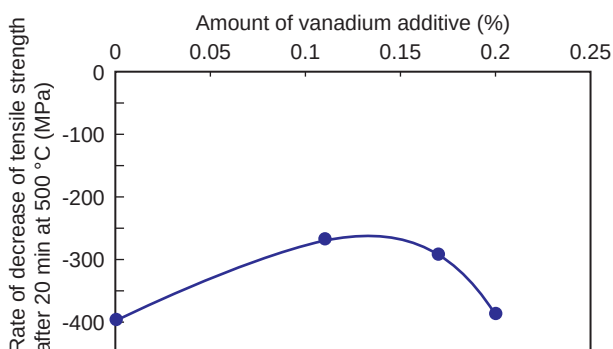
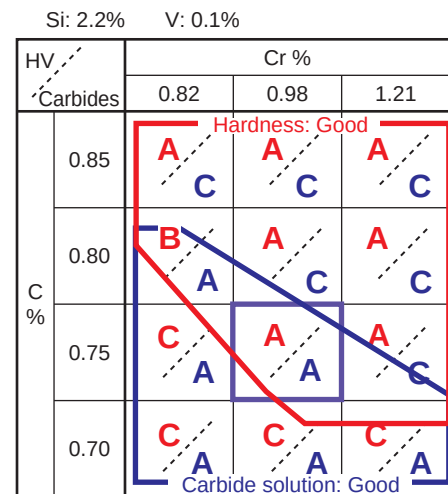


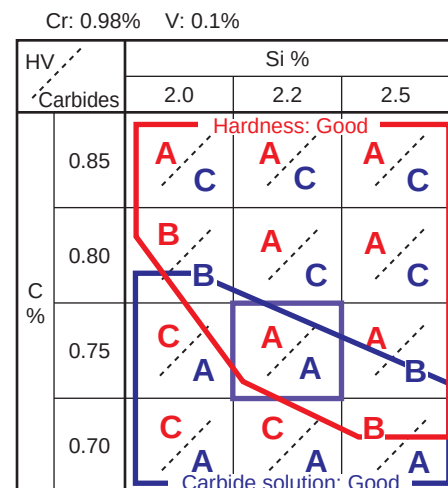
Fig. 1 Relation between vanadium additive amount and temper softening characteristic

またSiはばねのへたり特性を向上させる元素として知られているが、同時に炭化物生成挙動に影響することが知られているため、この両者を強度と炭化物の観点から最適添加量について検討した。

Fig. 2(a), (b)にその検討結果を示す。コイルリング時の未固溶炭化物量と窒化後の内部硬さの観点から実用例を基準に評価し、前者はサーモカルクによる計算値より、後者はこれまでのデータベースの硬さを、従来鋼を基準として判定した。すなわちFig. 2の各カラムの上段は硬度、下段は炭化物析出挙動の評価であり、従来よりも良好なものをA、低下するものをC、その臨界値に近いものをBとして示した。その結果、焼入れ焼戻し後の炭化物挙動(コイルリング性と窒化後の強度に影響)と窒化後の内部硬さの点から0.73%C-2.2%Si-1.0%Cr-0.1%Vを基本的な成分とした。



(a) Effect of C and Cr



(b) Effect of C and Si

Preferable Acceptable Not acceptable
HV: A B C
Carbides: A B C

Fig. 2 Example of predicted performance of wires in terms of carbide state and hardness after heat treatments

さらに高強度化するには未固溶炭化物を生じにくく、析出強化できる Mo の添加が有効と考えられる。しかし過剰な Mo 添加は焼き入れ性に大きく影響して、圧延からばねに至る種々の熱処理においても容易にマルテンサイトやベイナイトなどの過冷組織を生じて硬化することで折損などの製造上の問題を引き起こす。そのため Mo 添加も想定熱履歴の中で過冷組織を生じない最大量に設定した。

さらに Mo 同様、焼入れ時の加熱で容易に固溶する W の添加を検討した。W の析出硬化量は Mo ほど強くないものの、焼き入れ性への影響も小さく、過冷組織生成による製造上の問題も引き起こしにくい。そのためさらに窒化後の内部硬度を確保するために W を添加した。

このようにばねに必要な性能と製造性を確保するために関連する元素を総合的に検討し、開発鋼成分を実験により確認した。その成分は Table 1 に示すとおりで、Fig. 3 に $500^{\circ}\text{C} \times 3$ 時間加熱後の硬さ(焼き戻し軟化抵抗)とノッチ曲げ角度(コイル加工性)で整理した。その結果、基本成分に Mo, W を加えた開発鋼が強度と加工性の両立が可能な成分であることが確認された。

2.3. 開発合金の諸特性

実炉溶解した線から作製したオイルテンパ線のノッチ曲げ、自径巻き試験結果を Fig. 4, Fig. 5 に示す。冷間コイルリング性の指標としたこれらの結果では SWOCN-V に対し強度に対するコイルリング性に明確な優位性が認められる。これは Fig. 6 に示すように V の低減による未固溶炭化物の低減が要因と考えられる。

Table 1 Composition of developed steel

	(mass%)						
	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	W
Developed steel	0.75	2.16	0.71	0.98	0.13	0.10	0.15
SWOCN-V (Previous)	0.73	1.67	0.58	0.56	0.15	0.41	—

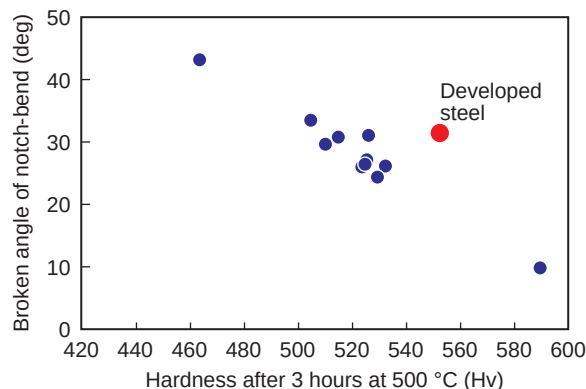


Fig. 3 Results of material composition study

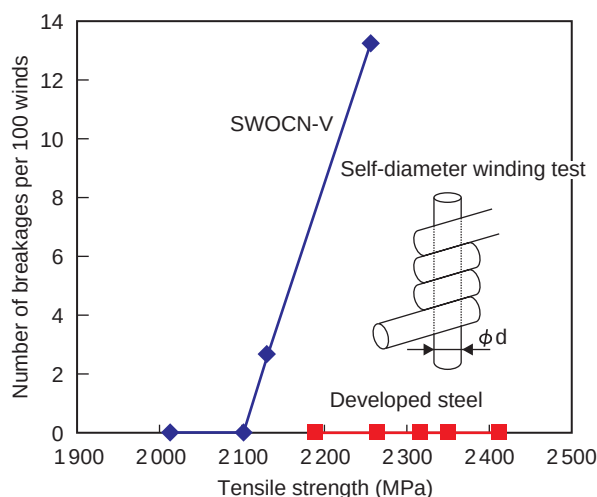


Fig. 4 Result of self-diameter winding test

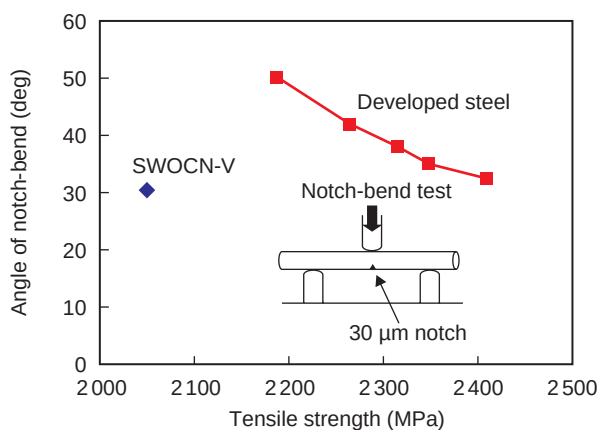


Fig. 5 Result of notch-bend test

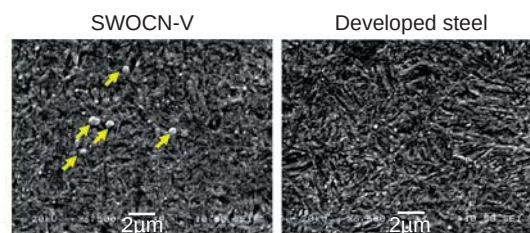


Fig. 6 Identification of non-dissolved carbide

次に低温焼戻特性を Fig. 7 に示す。オイルテンパ線の強度を高強度側にしても窒化相当温度で焼戻すと 2250 MPa 以上では、ほぼ同等硬さになることからオイルテンパ線の引張強度は 2250 MPa で設定できる。またオイルテンパ線の低温焼鈍特性を Fig. 8 に示す。SWOCN-V 材に対しほとんどの温度域で約 200 MPa の強度向上が認められる。開発材は溶解～オイルテンパ工程まですべて現有設備にて製造可能である。

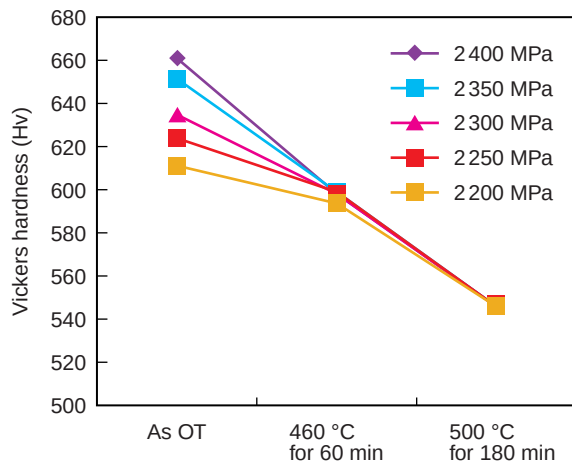


Fig. 7 Results of low-temperature tempering

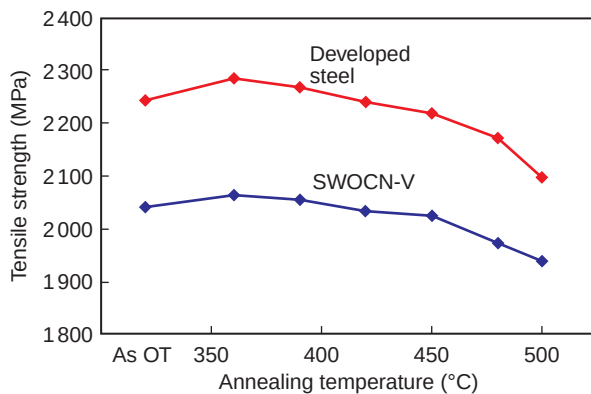


Fig. 8 Results of low-temperature annealing

3. 高強度弁ばねに適した窒化処理の検討

3.1. 窒化品質のねらい

窒化条件の中で、一般的に処理温度を上げると窒素拡散層硬さが上昇するが内部硬さが低下し、処理温度を下げた場合はその逆となる。弁ばね断面の応力負荷状態は内径表面が最も高く、高疲労強度を達成するためには、高N濃度を有する窒素拡散層を表層部に形成させ高硬度化させることが重要になる。しかし通常的气体窒化処理でそのような窒素拡散層を形成させるためには、 NH_3 ガスを多く分解させて多量の活性なHを発生させることが必須となるため、同時に発生するN量も多くなる。したがって窒化処理をおこなう鋼材の最表面部には高N濃度の化合物層が形成される。この化合物層はじん性が乏しいことから、過剰な化合物層は疲労強度の低下をもたらす⁽³⁾。本開発においては、窒素拡散層硬さと化合物層をコントロールし⁽⁴⁾疲労強度に最適な窒化品質を見出すこととした。

3.2. 窒化条件の最適化

鋼材最表面部に化合物層が形成するかどうかは、鋼材表面から浸入するN量、すなわち NH_3 ガスの分解量と、鋼材

内部へ拡散するN量とのバランスによって決まる。化合物層の形成を抑えるためには、最もN濃度が高くなる最表面部のN濃度が約 5 wt% 未満になるように、 NH_3 ガスの分解率を制御してやる必要がある。

NH_3 ガスの分解率および鋼材中へのNの拡散速度はどちらも温度の影響を大きく受ける。また、鋼材中へのNの拡散速度は鋼材の組成によっても左右されるため、その最表面部に化合物層を形成させないためには、それぞれの鋼材に合わせた NH_3 の分解率となるように雰囲気調整をおこなう必要がある。

ただし、化合物層形成を防止するガス組成、窒化温度のみでは弁ばね表面に存在する酸化膜の還元が十分におこなわれず、窒化が不安定になるという問題が発生する。そこで筆者らは、窒化前の弁ばね表面に存在する酸化膜をフッ化物へ置換した後に窒化することとした。このフッ化工程は冷間コイリング後の低温テンパより低い温度で処理するため、硬度低下の懸念は無い。フッ化物へ置換された鋼表面は窒化雰囲気中では酸化膜より活性化するため、比較的低い NH_3 ポテンシャルで最表面の化合物層を生成させずに窒化が進行する。

開発材に適した窒化処理を検討するに当たり、最初に窒化温度と時間を決定することとした。テストは弁ばねを小型窒化炉にて、温度と時間を変化させてフッ化後窒化処理し、それぞれの内部硬さと窒素拡散深さを測定した。なお前記テストは NH_3 と H_2 ガス比率を一定にした窒化をおこなった。結果をFig. 9に示す。開発材の目標値を内部硬さHv610以上とし、窒化時間は量産性も考慮して2 hrとした上で窒化温度は470°Cに決定した。

次に開発材に対し各温度で化合物層が形成した場合を▲、しない場合を●で示すと Fig. 10 のようになる。温度が決まれば窒化雰囲気中の NH_3/H_2 ガス比率によって化合物層の有無が決まることがわかる。したがって化合物層が形成しない領域かつ境界線に近い組成で窒化処理をおこなうことによって、表層部に化合物層を有しない高N濃度の窒素拡散層を形成することが可能となるのである。

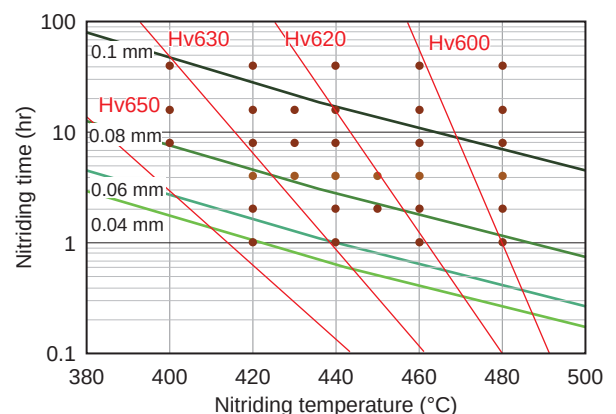


Fig. 9 Relation among temperature, time depth of nitriding, and internal hardness

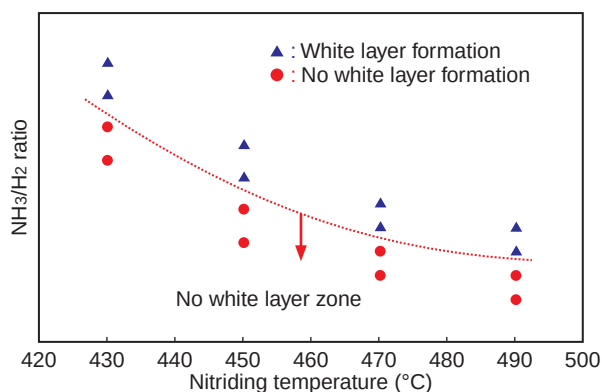


Fig. 10 Relation among gas composition, nitriding temperature, and white layer

3.3. 窒化化合物層の疲労強度への影響調査

窒化化合物層の影響を明らかにするため、 NH_3/H_2 ガス比率の変更により二種類の弁ばねサンプルを作製した。Fig. 11 の SEM 写真では、各サンプルの化合物層厚さを示している。サンプルAは化合物層厚さが $2\ \mu\text{m}$ 、サンプルBでは化合物層が認められない。これらについて星型疲労試験機を用いて疲労強度を評価した。Fig. 12 に S-N 線図を示す。■が内部起点、□と○が表面起点で折損したものを示す。この結果から窒化化合物層が厚いサンプルAはすべて表面起点にて折損する。逆に化合物層が存在しないサンプルBは内部起点の破損形態が多くなる。疲労強度は内部起点と表面起点が共存するサンプルBが、表面起点のみのサンプルAに対し高いことがわかる。この原因について Fig. 13 を用いて説明する。Fig. 13 には弁ばねの最表面近傍に負荷される応力分布を示している。弁ばねで最も応力が高くなる内径表面近傍では窒化拡散による高硬度化で疲労強

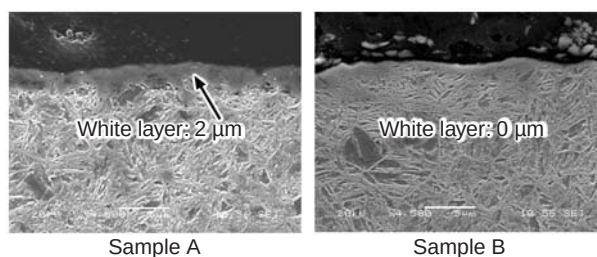


Fig. 11 SEM image of fatigue test specimens

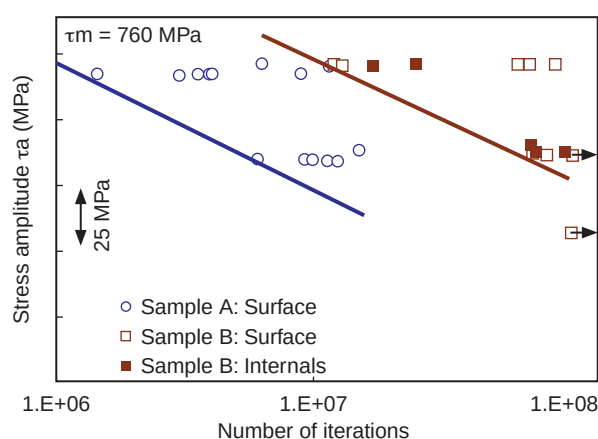


Fig. 12 Fatigue strength effect due to white layer thickness

度を高めているが、窒化化合物層 ($\epsilon\text{-Fe}_3\text{N}$) は稠密六方晶であり硬く脆いため⁽⁵⁾、最表面に存在した場合微小な切欠を起点に疲労破損が進行したと推察する。対して SWOCN-V 材では化合物層が $2\ \mu\text{m}$ レベルで存在するが、低負荷領域においては最表面に負荷される応力も低いため、化合物層の強度低下が顕在化しなかったものと考えられる。

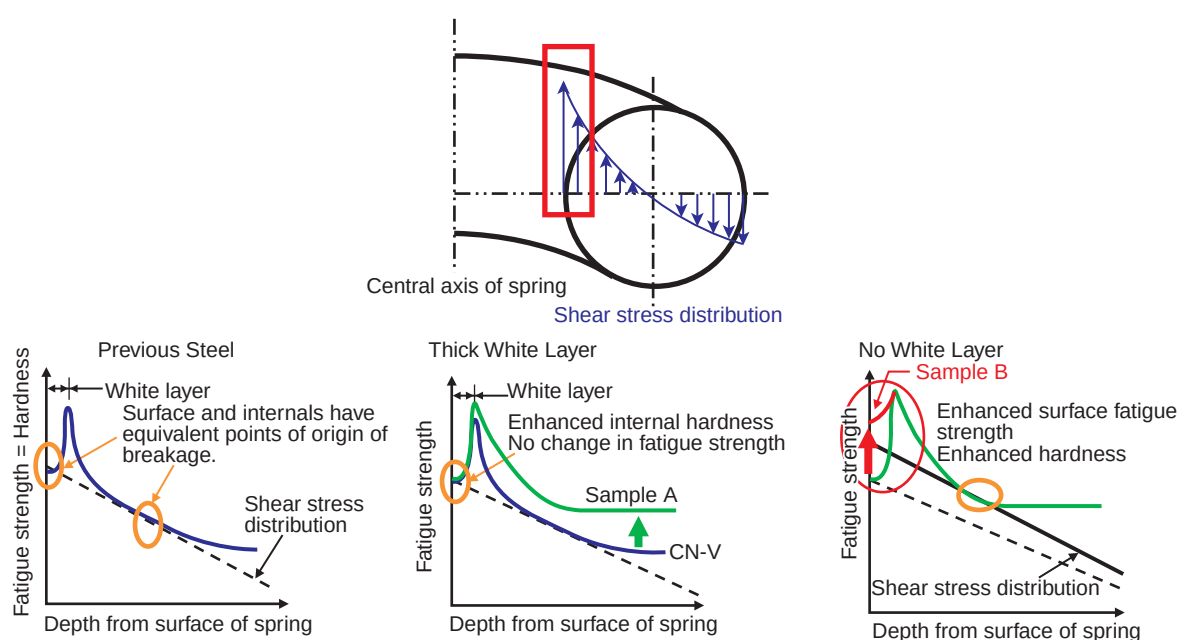


Fig. 13 Schematic diagram of influence of white layer thickness on fatigue strength

4. 高強度弁ばねの各種特性

4.1. 疲労特性

本開発材である高強度弁ばねと SWOCN-V の星型疲労試験の結果を Fig. 14 に示す。疲労試験ははじめに $\tau_m = 686$ MPa でおこなったが開発材の折損が認められなかったため、 $\tau_m = 760$ MPa で再度テストをおこなった。そのため Fig. 14 の比較材としての SWOCN-V 材の S-N データは τ_m の差異を換算したもので示している。

開発材の SWOCN-V 材に対する優位性は明らかで 20% の疲労強度向上が認められた。これは Fig. 15 に示す疲労試験用弁ばねの硬度こう配が、開発材が SWOCN-V 材に対し全域で向上していること、化合物層レスにより表面疲労強度の低下を防止していることが要因と考えられる。

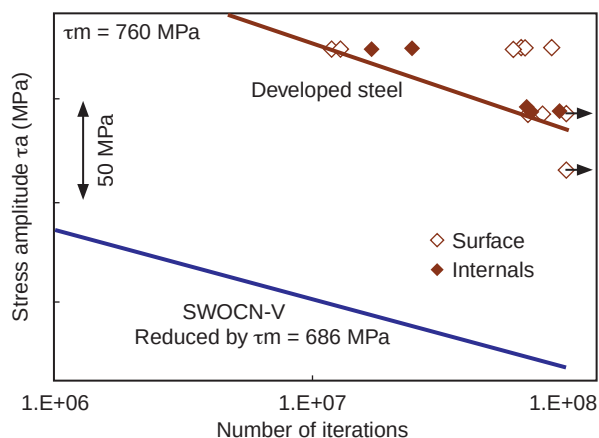


Fig. 14 Fatigue characteristic of developed steel

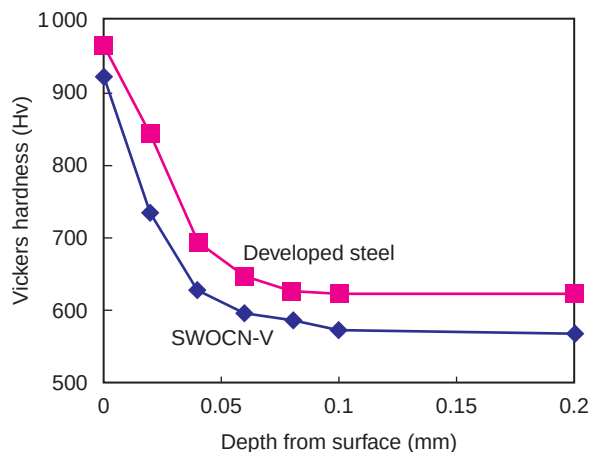


Fig. 15 Results for hardness after nitriding

4.2. へたり特性

弁ばねをエンジン高負荷環境下で用いる場合、高速運動による高熱環境下にさらされることで、荷重低下を起こすことがある。荷重低下によりバルブ挙動低下を招き、場合によっては、エンジンを破損する恐れがある。したがって、疲労強度上昇に対応した耐へたり性の向上が必要となる。

へたり特性は、各応力に締め付けたばねの150℃、100 hr 保持後の荷重低下量を測定することで評価をおこなった。へたり測定結果を Fig. 16 に示す。SWOCN-V 材に対し約 25% のへたり性の向上が認められ良好な耐へたり性を有することがわかる。この理由としては、Si や Mo のマルテンサイトマトリックス強化や Cr, V, W の微細炭化物の析出が考えられる。

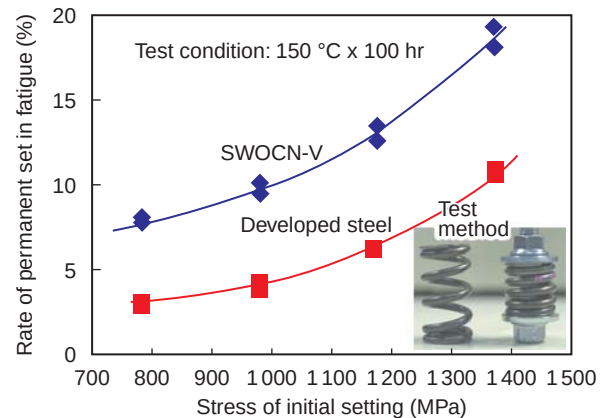


Fig. 16 Permanent set in fatigue characteristic of developed steel

5. 高強度弁ばねの適用事例

開発した高強度弁ばねを 2006 年 MotoGP マシンに適用することで、シリンダヘッド高さを低く、回転数を高く、カムリフト量を大きくするなどの設計変更が可能となった。当該マシンを操るニッキー・ヘイデン選手は、2006 年の MotoGP ワールドチャンピオンを獲得した。

さらに MotoGP で得られたノウハウをフィードバックし、モトクロスレーサバイクである CRF250R (Fig. 17) に量産車として初適用した。高強度弁ばねの適用により、高回転化と耐久性を両立させ、高回転領域でのエンジン出力特性を大幅に向上させた。量産機種への順次適用を検討している。



Fig. 17 CRF250R 2010 model using developed valve springs

6. まとめ

- (1) SWOCN-V 材をベースに、高強度、高じん性を両立させる成分検討をおこない $0.73\text{C}-2.2\text{Si}-1.0\text{Cr}-0.1\text{Mo}-0.1\text{V}-0.15\text{W}$ 鋼を選定し開発鋼とした。
- (2) オイルテンバ線の冷間コイルリング性を確保しながら窒化処理後の必要硬さを満足することができた。
- (3) 窒化化合物層の疲労強度への影響を明らかにし、高疲労強度を達成するためには化合物層を生成しない窒化条件が必要であることがわかった。フッ化による活性化反応を用いることで、化合物層レスの窒化が実現可能となった。
- (4) 開発材による高強度弁ばねは、SWOCN-V 材に対し疲労強度で20%、耐へたり性で25%の向上が認められた。

あとがき

高性能エンジンのさらなる高出力化のみならず、自動車エンジンのコンパクト化、軽量化に寄与することで燃費性能への貢献でお客様へ訴求していける商品の開発へつなげたい。

謝 辞

本開発にあたり、御協力を頂いた日本発条株式会社の皆様へ紙面を借りて厚く御礼申し上げます。

参考文献

- (1) 萩原好敏, 伊藤幸生, 小曾根敏夫, 山田勝彦, 林博昭, 小野田光芳: 高強度弁ばね用浸炭窒化鋼オイルテンパー線の開発, ばね論文集, No.35, p.13-20(1990)
- (2) 青木利憲, 鈴木秀和, 榊原隆之, 脇田将見, 西村泰輔: 加工性と疲労強度向上を両立した超高強度弁ばねの開発, ばね論文集, No.45, p.25-30(2000)
- (3) 近藤覚, 伊藤佳伸, 中野修, 内田尚志, 小野田光芳: ガス窒化したばねの疲労強度に及ぼす化合物層の影響, 熱処理, No.36, p.34-40(1995)
- (4) Fujikawa, H., Watanabe, T.: Advanced Surface Hardening Techniques Using Gas Process, Solid State Phenomena, Vol.118, p.161-166(2006)
- (5) 高瀬孝夫: 鋼の表面硬化法としての窒化, 鉄と鋼, No.66, p.1423-1434(1980)

■著 者■



前川 恵一



村上 敦



橋村 雅之



鎗田 博



渡辺 崇則