

二相鋼の表面硬化処理法の検討と歯車特性の向上

Examination of Surface Hardening Process for Dual Phase Steel and Improvement of Gear Properties

福岡 和明 FUKUOKA Kazuaki JFE 条鋼 仙台製造所 研究開発部 主任部員
富田 邦和 TOMITA Kunikazu JFE 条鋼 仙台製造所 研究開発部長・博士(工学)
白神 哲夫 SHIRAGA Tetsuo JFE 条鋼 研究主監・博士(工学)

要旨

疲労強度の向上と熱処理後のひずみ低減を目的として開発した二相鋼の、化学成分、組織形成、浸炭特性、並びに熱処理ひずみに及ぼすフェライト分率の影響を述べた。さらに、表面硬化処理法の最適化による疲労強度向上について検討した結果、真空浸炭窒化後に二段ショットピーニングを行うことで、従来材に対し29%の疲労強度向上が得られた。疲労強度向上の寄与率を評価したところ、鋼種変更が9%、熱処理変更（真空雰囲気と窒素添加）が12%、二段ショットピーニングの付与が7%となった。

Abstract:

The dual phase steel was developed for improvement of fatigue strength and decrease in heat treatment distortion. The chemical compositions, formation of microstructure, carburizing properties, and influence of ferrite area fraction on heat-treatment distortion was discussed. Additionally, improvement of fatigue strength with optimizing of surface hardening process was examined. As a result, pitting fatigue strength was improved by 29% compared with conventional one. The breakdown is; change in steel 9%, change in heat treatment condition (vacuum atmosphere and nitrogen added) 12%, and addition of double shot peening 7%.

1. はじめに

自動車や建機のトランスミッション、足回りに使用される歯車では強度と同時に機械加工性¹⁾も重要であることから、JIS SCr420, SCM420, SCM822 などの肌焼鋼を用いて鍛造・機械加工を行い、その後、浸炭により表面を硬化させる歯車が主要部分を占めている。

近年、これらの歯車には軽量・コンパクト化の要求から、高強度化の要望が大きい。また、自動車用途においてはノイズの低減要望から、熱処理による歯車のひずみが問題となってきている²⁾。

JFE 条鋼は、トランスミッション用ギヤや足回り用ギヤを対象に、高強度化とともに、静粛性を考慮し、浸炭焼入れ時の歯車の変形を抑え、ギヤノイズを低減することを目標に「二相鋼」を開発した^{3,4)}。

本論文では、「二相鋼」の特徴と、さらにこの「二相鋼」を用いて表面硬化処理の最適化を検討し、歯車の疲労強度向上を図った結果について報告する。

2. 二相鋼の特徴

2.1 二相鋼のメリット

二相鋼のメリットは以下の3点である。

- (1) 従来の製造方法およびラインをそのまま使用可能
- (2) ひずみを抑えることにより、不良率の低減と歯型修正の削減が可能
- (3) 疲労強度は従来鋼と同等以上

二相鋼は、特殊な製造ラインや工程を必要とせず、従来の製造方法を大幅に変更する必要のないように設計された材料であり、製作工程の変更や、加工条件の変更は必要ない。また、従来鋼よりも浸炭焼入れでの熱処理ひずみが抑えられるため、不良率の低減が期待できる。従来は製造ラインにて歯面研磨などで歯型修正を行っていた場合には、その工程省略も可能となる。さらに、二相鋼は従来鋼と同等の浸炭特性を備えており、疲労強度は従来鋼と同等以上である。

2.2 化学成分および浸炭特性

二相鋼の成分例として、JIS SCM420 相当材の成分を表 1

表 1 二相鋼の化学成分例

Table 1 Example of chemical compositions of dual phase steel (mass%)

Steel	C	Si	Mn	Cr	Mo	Nb
Dual phase steel	0.21	1.43	0.43	0.61	0.78	0.021
JIS SCM420	0.21	0.21	0.76	1.10	0.18	—

に示す。二相鋼の成分の特徴としては以下の点があげられる。

- (1) Si, Mo 添加による浸炭内部組織の二相化
- (2) Mn, Cr 調整による焼入れ性コントロール

Si, Mo は Ac_3 変態点を上昇させる元素である。 Ac_3 変態点を上昇させると、従来浸炭の焼入れ温度で浸炭内部組織をオーステナイト (以下, γ) とフェライト (以下, α) の二相組織にすることが可能となる。その結果、後焼入れ時に体積膨張をともなうマルテンサイト変態の量が少なくなり、変形を抑えることが可能となる。なお、内部にフェライトが析出すると、硬さの低下が予想されるが、Si のフェライト固溶強化機能を使ってフェライト硬さを高めることで硬さ低下を補償している。

図 1 を用いて二相鋼の浸炭時の組織形成について説明する。従来から行われている浸炭条件にて浸炭する場合、従来の肌焼鋼では浸炭加熱時に γ 単相域まで加熱される。その後、温度を少し下げて焼入れされるが、焼入れ温度でも浸炭により炭素濃度が上昇した表層付近から、炭素濃度が素材成分のままである内部まですべて γ 単相組織が維持される。それに対し、二相鋼は、変態点を上昇させており、浸炭時はどの部位においても γ 単相であるが、焼入れ温度に下げた場合には内部の非浸炭領域は γ と α の二相の領域に入るため、焼入れると γ はマルテンサイト変態するものの、

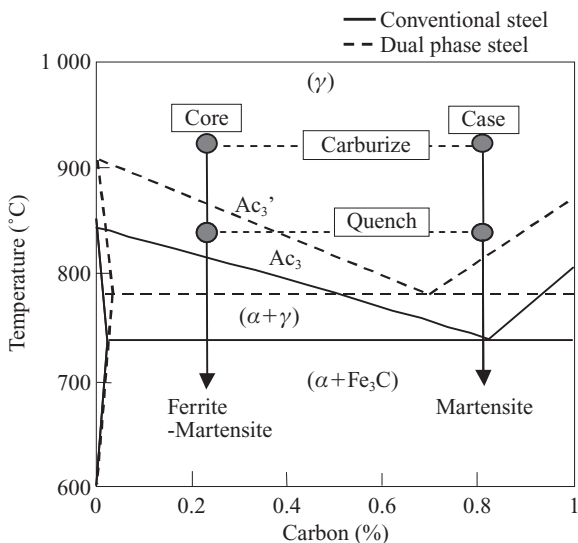


図 1 二相鋼の浸炭時における組織変化

Fig. 1 Phase transformation of dual phase steel during carburizing

α はそのまま残留する。このように、内部のマルテンサイト変態を少なくすることにより、変態膨張を緩和し、変形を抑える点に二相鋼の特徴がある。

写真 1 に従来の条件 (図 2) で浸炭した、二相鋼と SCM420 の浸炭焼入れ後の組織を示す。二相鋼の組織は SCM420 と同様に高炭素量まで浸炭された領域はマルテンサイト単相組織であるが、内部は、マルテンサイト組織中にフェライトが分散した組織となっている。

図 3 には、表 1 の二相鋼成分をベースに、Si 添加量を変化させたときの粒界酸化層深さの変化を示す。粒界酸化層は Si 添加量が 0.25% の場合に深さが最大となり、それ以上

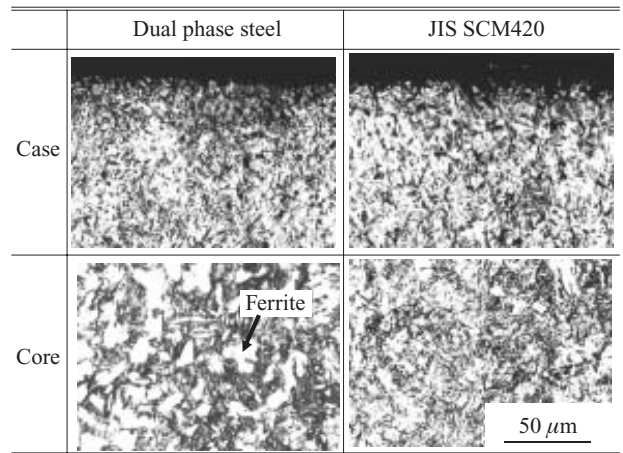


写真 1 二相鋼の浸炭後の組織

Photo 1 Microstructures of carburized and quenched dual phase steel

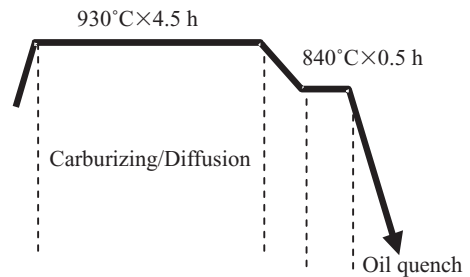


図 2 浸炭条件 (焼もどし: 160°C × 2 h)

Fig. 2 Carburizing condition (Temper: 160°C 3 × h)

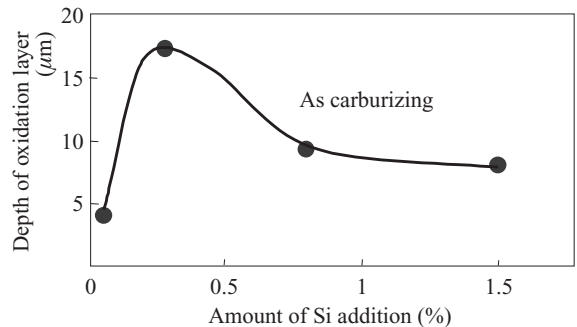


図 3 Si 添加による粒界酸化層深さの変化

Fig. 3 Change in grain boundary oxidation layer depth with Si content

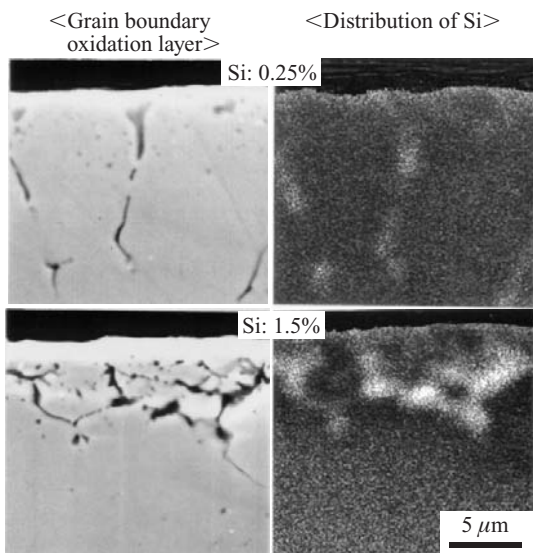


写真2 Si添加による粒界酸化層の違い

Photo 2 Difference in grain boundary oxidation with Si content

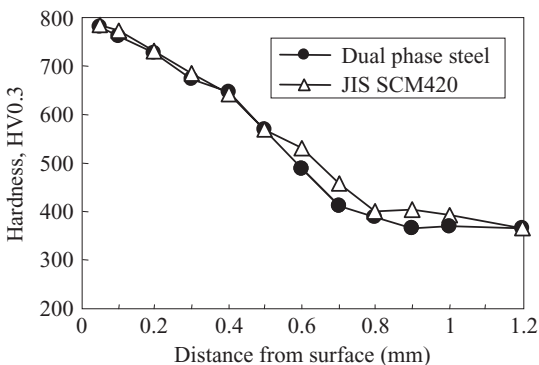


図4 浸炭焼入れ後の硬度分布

Fig.4 Hardness distribution after carburizing and quenching

添加すると浅くなっていく傾向を示す。写真2に粒界酸化層深さがピークである Si: 0.25%鋼と、二相鋼である Si: 1.5%鋼の粒界酸化層の状況を示す。0.25% Si 鋼に比べて、1.5% Si 鋼の酸化層が浅い。また、0.25% Si 鋼では粒界に沿って酸化が進行しているのに対し、1.5% Si 鋼では粒界と粒内のいずれでも酸化が進行している。なお、この酸化部分には Si の濃化が認められた。

図4に二相鋼と従来肌焼鋼の浸炭焼入れ後の硬度分布を示す。二相鋼は焼入性を従来の肌焼鋼と同等以上に調整しているために、浸炭部の硬度分布に両者で差はない。また、内部については二相鋼ではフェライトが析出しているものの、焼入性の確保と Si によるフェライト相の固溶強化で十分な硬さが得られている。

2.3 浸炭焼入れによる変形

図5に二相鋼および従来の肌焼鋼の浸炭前後での変形量の差を示す。図中に示す試験片を用いて浸炭前後の開口径の変化量を調査した。硬度の上昇、すなわち焼入性の上昇

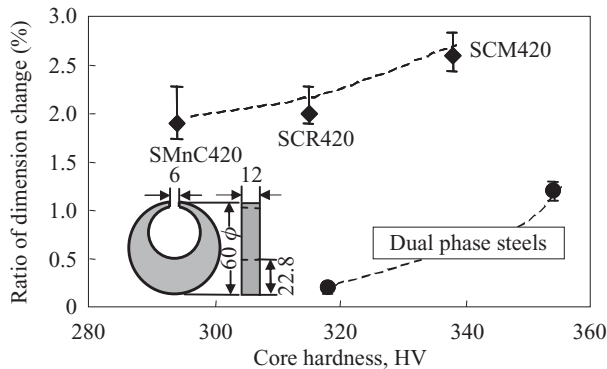


図5 浸炭焼入れによる変形量

Fig.5 Distortion by carburizing and quenching

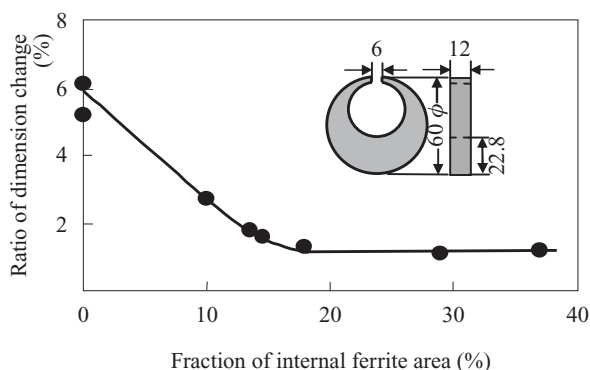


図6 浸炭時の熱処理ひずみ量と内部フェライト面積率

Fig.6 Relationships between heat treatment distortion and internal ferrite area fraction

にともない、変形量は大きくなる傾向を示すが、二相鋼では従来鋼に比べて変形量が1/2以下に抑えられていることが分かる。

図6に二相鋼の変形量に及ぼすフェライト面積率の影響を示す。内部のフェライト面積率が増加するにつれて変形量は減少するが、15%を超えると変形量は一定に達する。これより、二相鋼の熱処理変形を抑制するにはフェライト面積率を15%以上とすればよい。

3. 表面硬化処理活用による歯車の高強度化

3.1 破壊の抑制

歯車の疲労破壊は歯元の曲げ破壊と歯面のピッチング破壊に大別されるが、使用条件の高面圧下にもなって、ピッチング破壊によって寿命が決まることが多い。

ピッチング破壊における亀裂の発生には次の2通りが考えられる。1つは表面の強度低下部分からの亀裂発生である。もう1つはヘルツ応力が最大となる表面直下の強度低下部分での亀裂発生である。

従来の変成ガスを用いた浸炭では雰囲気中に酸素が存在する。そのため、ギヤ表面の粒界では酸素結合力の高い Si, Mn, Cr などが酸化して粒界が脆化し⁵⁾、粒界酸化部位から

亀裂が発生しやすくなる⁶⁾。これより、表面での亀裂発生については粒界酸化の抑制が最も重要と思われる。さらに歯面同士は接触と同時にすべりを生じ、表面に引張応力が加わる。その応力を緩和するために、圧縮の残留応力を高めることも有効と思われる。

転動面においては、歯車同士の接触による温度上昇により表面直下で低温焼もどしが起こる⁷⁾。浸炭により炭素を多く含んだマルテンサイトは低温で焼もどされると、ε炭化物やセメントイトに分解し、その周囲は炭素濃度が低下し、軟化が生じる。表面に粒界酸化などの亀裂発生サイトが少ない場合、最大ヘルツ応力のかかる表面直下の軟化部より亀裂が発生し、破壊に至る場合が考えられる。

この表面直下の亀裂発生については焼もどし軟化の抑制が重要となる。そのためには鋼材に焼もどし軟化抑制元素を添加する必要がある。さらに固溶窒素の増加も焼もどし軟化抑制に効果がある⁸⁾と考えられる。

3.2 最適条件下での疲労強度

歯車としての疲労強度を向上させるために、今回は表面硬化方法に着目して最も有効と思われる方法を検討した。表2に検討に用いた二相鋼(DP)と比較鋼であるSCM822Hの化学成分を示すが、二相鋼は疲労強度の向上のため、低温焼もどし軟化抑制元素であるSi, Crを増量した成分とした。

図7に熱処理条件を示す。表面の粒界酸化を抑制するために、従来の変性ガスによる浸炭に対して、今回は真空浸炭を検討した。さらに浸炭後に窒化を行うことにより、固溶窒素による焼もどし軟化の抑制を図った。なお、浸炭温度および焼もどし温度は従来と同一条件である。

次に、圧縮残留応力を付与し、表面での亀裂発生を抑制するためにショットピーニングを実施した。表3にショット

ピーニング条件を示すが、今回は圧縮残留応力を最も効果的に付与するため、投射速度の速いエアノズルタイプのハードショットピーニング⁹⁾を採用し、従来と同一サイズの粒径でショット後、粒径の小さいショットピーニングを行う二段ショットピーニングとした。

二相鋼についてはこれらの表面硬化処理を行った後、ローラーピッチング試験を実施した。図8に試験片と試験条件を示す。一方、比較鋼であるSCM822Hについては従来のガス浸炭のみを施し、ローラーピッチング試験に供した。

図9に試験結果を示す。SCM822Hを用いて従来の表面硬化処理であるガス浸炭のみを実施したものに対し、二相鋼に真空浸炭窒化処理を行い、さらに二段ショットピーニ

表3 ショットピーニング条件
Table 3 Shot peening condition

Condition	Conventional S.P.	Double S.P.	
		1st	2nd
Projection speed	Slow	Fast	Fast
Diameter of shot	0.8 mm	0.8 mm	0.08 mm
Hardness of shot	52-57 HRC	60 HRC	60 HRC
Arc height	0.52 mmA	0.82 mmA	0.32 mmA
Coverage	over 300%	over 300%	over 300%

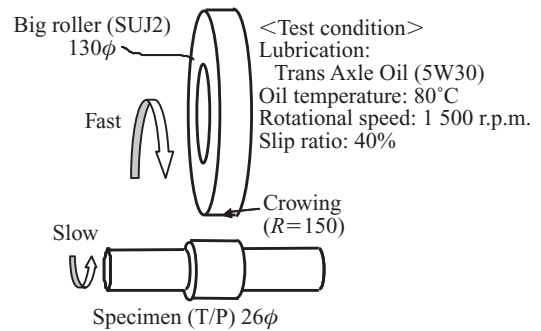


図8 ローラーピッチング試験条件
Fig.8 Roller pitting test condition

表2 供試鋼の化学成分

Table 2 Chemical compositions of steel for fatigue test

Steel	(mass%)						Ac ₃ (°C)
	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	
DP	0.23	1.75	0.42	1.52	0.38	0.15	899
SCM822	0.22	0.25	0.75	1.15	0.36	—	816

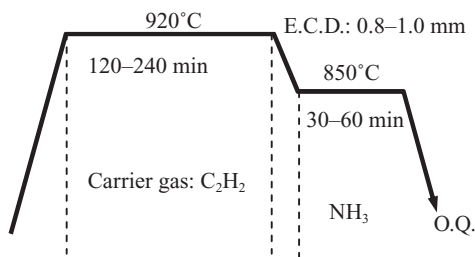


図7 真空浸炭窒化条件

Fig.7 Condition of vacuum carbonitriding process (Temper: 160°C 3 × h)

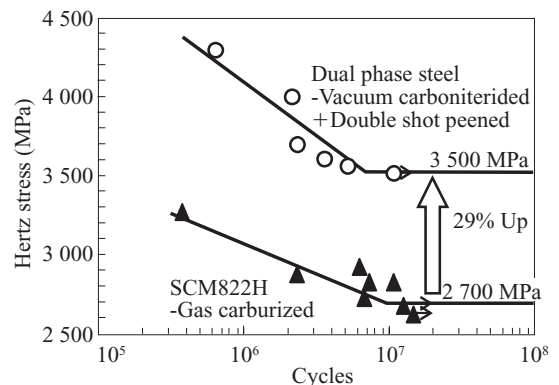


図9 鋼種変更および表面硬化処理最適化のローラーピッチング疲労特性への影響

Fig.9 Effect of steel class and surface hardening process in roller pitting test

ングを行うことで、疲労限が約 29% 向上することが確認できた。

3.3 疲労強度向上に対する各種要因の検討

二相鋼を用いて表面硬化処理を最適化した場合の疲労強度向上について、以前調査した結果を元に各種要因の寄与率を検討した。

図 10 に低温で焼もどしを行った場合の軟化特性を示す。SCM822H に対し、二相鋼の焼もどし硬度は 300℃、400℃いずれでも約 100HV 程度高い値を示す。さらに二相鋼で、浸炭と同時に窒化を行うことにより、300℃、400℃いずれの温度でも約 100 HV 程度の硬度上昇が認められる。これより、SCM822H から二相鋼への鋼種変更と窒化は疲労強度向上に対してほぼ同程度の効果を持つと推定される。

図 11 と 12 および 13 に過去に行ったローラーピッチング試験の結果を示す。

図 11 は SCM822H と二相鋼に真空浸炭窒化と二段ショットピーニングを施したものの結果である。二相鋼は SCM822H よりも疲労限が 9% 向上している。

図 12 は SCM822H のガス浸炭材と、二相鋼のガス浸炭窒化材の結果である。鋼種を二相鋼とし、さらに窒素を添加することにより 15% の疲労限の向上が認められた。

図 13 は二相鋼を用いてガス浸炭窒化後に二段ショットピーニングを施したものと真空浸炭窒化後に二段ショットピーニングを施したものの比較である。また、写真 3 にはそれらの試験片の粒界酸化層発生状況を示す。粒界酸化が約 7 μm 程度認められたガス雰囲気での熱処理材に対して、粒界酸化が発生しない真空浸炭窒化処理材の方が疲労強度が 6% 向上している。

図 14 には二相鋼のガス浸炭窒化材と、真空浸炭窒化材に二段ショットピーニングを施した材料のローラーピッチング疲労強度を示す。雰囲気ガスをガス⇒真空とし、さらに二段ショットピーニングを実施することにより疲労限は約 13% 向上している。なお、ショットピーニングによる疲労強度向上は、表層付近の圧縮残留応力を高める効果によるところ

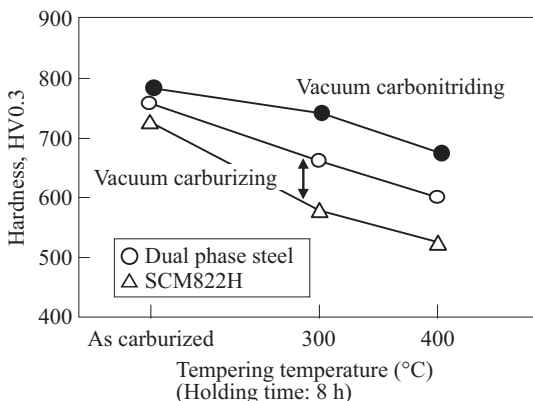


図 10 焼もどし軟化特性

Fig. 10 Characteristics of the temper softening resistance

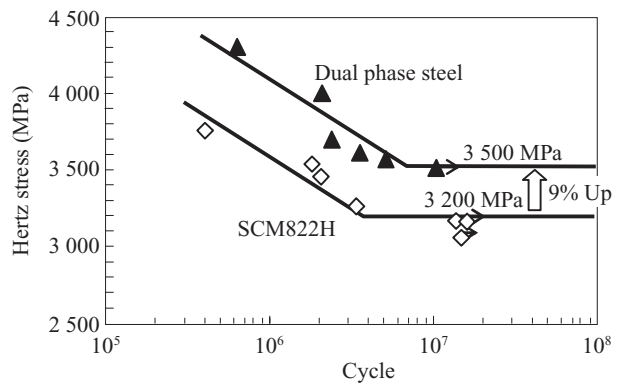


図 11 ローラーピッチング疲労特性への鋼種変更の影響

Fig. 11 Effect of steel class in roller pitting test (vacuum carbonitrided and double shot peened)

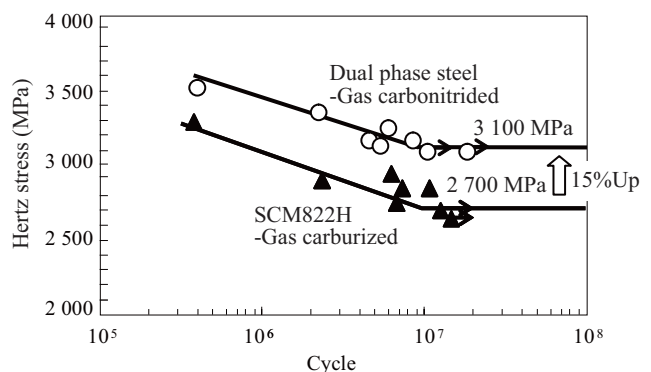


図 12 ローラーピッチング疲労特性への鋼種変更と窒素添加の影響

Fig. 12 Effect of steel class and nitriding in roller pitting test

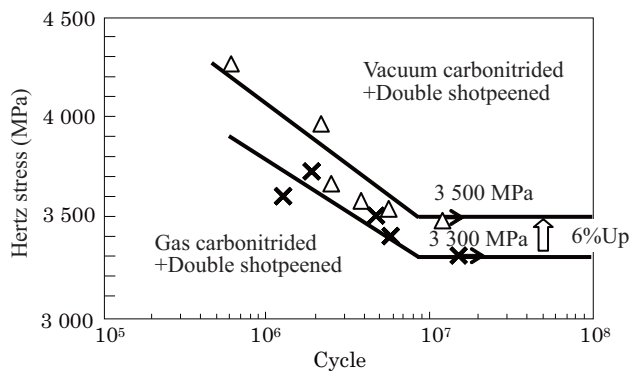


図 13 ローラーピッチング疲労特性への熱処理雰囲気の影響

Fig. 13 Effect of atmosphere of carbonitriding in roller pitting test (Dual phase steel)

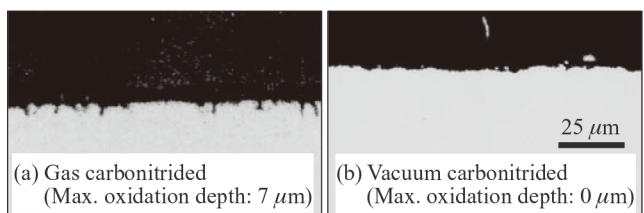


写真 3 熱処理雰囲気の粒界酸化への影響

Photo 3 Effect of atmosphere on grain boundary oxidation

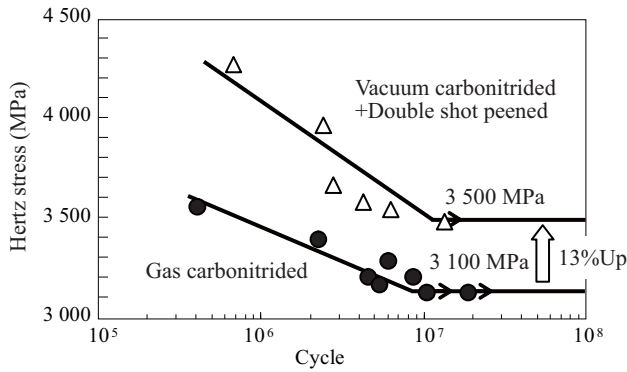


図 14 二相鋼のローラーピッチング疲労特性に及ぼす浸炭窒化雰囲気とショットピーニングの影響

Fig. 14 Effect of atmosphere of carbonitriding and shot peening (Dual phase steel)

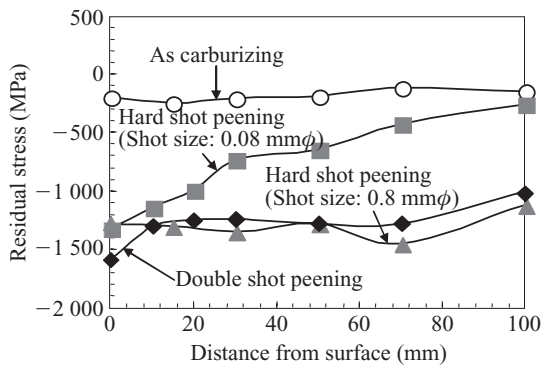


図 15 各種ショットピーニングと残留応力分布

Fig. 15 Difference in residual stress distribution with shot peening change (Dual phase steel)

が大きいと考えられるが、**図 15** に示すように今回実施した二段ショットピーニングでは通常の一段ショットピーニングに比べて最表層の圧縮残留応力が 300 MPa 程度高くなっている。

以上の検討に基づき、疲労強度向上へ寄与した因子とそれぞれの寄与率を整理した結果を**表 4** に示す。鋼種変更による疲労強度向上効果は 9%、表面硬化処理を従来のガス浸炭から真空浸炭窒化にすることによる向上効果は 12% で、その内訳は、雰囲気変更（真空化）が 6%、窒化が 6% となった。また、二段ショットピーニングにより疲労強度は 7% 向上する。

4. おわりに

疲労強度の向上と熱処理後のひずみ低減を目的として開発した二相鋼を使用して表面硬化処理方法の最適化を検討し、以下の結果を得た。

表 4 ピッチング疲労強度への各因子の寄与率

Table 4 Each effect to improve pitting fatigue strength

Measures	Effect to improve pitting fatigue strength	Remarks	
Change of steel	9%	Fig.11	Fig.12 (15%)
Nitrogen added	6%	15%-Fig.11	(15%)
Vacuum atmosphere in heat treatment	6%	Fig.13	Fig.14 (13%)
Double shot peening	7%	13%-Fig.13	

- (1) 二相鋼を用いて表面硬化処理を最適化することにより、SCM822H ガス浸炭材に対して 29% のピッチング疲労強度の向上が得られた。
- (2) 29% のピッチング疲労強度向上のうち、SCM822H から二相鋼への鋼種変更による向上効果は 9% であった。
- (3) 表面硬化処理を従来のガス浸炭から真空浸炭窒化に変更することにより 12% の向上効果が得られ、さらに二段ショットピーニングを施すことにより疲労強度は 7% 向上した。

二相鋼は低ひずみ化により歯面の振れを抑える効果も持つが、今回はその影響は検討していない。実際の歯車の耐久性を考えると、この低ひずみ化によりさらに疲労強度が向上するものと期待される。

参考文献

- 1) 関川岳, 田中誠一, 西村公男. 自動車技術. 2008, vol. 62, no. 6, p. 96-100.
- 2) 荻野恵司. 熱処理. 2002, vol. 42, no. 4, p. 234-238.
- 3) 馬島弘, 村上俊之, 江口豊明. CAMP-ISIJ. 1995, vol. 8, p. 638.
- 4) 馬島弘, 村上俊之, 江口豊明, 金丸武. CAMP-ISIJ. 1996, vol. 9, p. 1414.
- 5) 吉崎正敏, 橋本忠. 日本機械学会論文集 (C 編). 1999, vol. 65, no. 630, p. 262-269.
- 6) 小野和正, 吉田将也, 中澤崇徳, 井上吉弘, 井上洋介. CAMP-ISIJ. 2005, vol. 18, p. 1628.
- 7) 長瀬長太郎. 機械の研究. vol. 57, no. 3, p. 366-373.
- 8) 横瀬敬二, 妹尾達行, 武本慎一. ショットピーニング技術. 2007, vol. 19, no. 3, p. 2-11.
- 9) 松井勝幸, 安藤柱. 自動車技術会. 2006, no. 15-06 シンポジウム, p. 1-5.



福岡 和明



富田 邦和



白神 哲夫