

高強度高周波焼入れクランクシャフトの開発

Development of High-strength Induction Hardened Crankshaft

恩 田 勇 人*
Hayato ONDA
工 藤 洋 嗣*
Hirotsugu KUDO

浅 井 鉄 也*
Tetsuya ASAI
室 伏 和 昌*
Kazumasa MUROFUSHI

藤 木 賢 治*
Kenji FUJIKI

要 旨

ディーゼルエンジン向けに疲労強度と耐摩耗性が高い高周波焼入れクランクシャフトを開発した。ディーゼルエンジンのクランクシャフトは高い筒内圧に伴う高負荷対応と、潤滑油中に燃焼成分として混入するカーボンの影響による摺動部耐摩耗性が必要とされる。そこで本開発では軸部に加え、フィレット部も同時に焼入れ硬化させることで高強度化と生産工程の短縮化を両立させ、疲労強度、摺動部耐摩耗性、生産性に優れたクランクシャフトを開発した。これに用いる材料としてフィレット部焼入れ時により発生する曲りの矯正性が高い高周波焼入れクランクシャフト用材料を開発した。併せて今まで被削性向上成分として使用してきた鉛についても材料の介在物制御を行うことで、加工性を犠牲にせず鉛フリー化を達成した。

ABSTRACT

A high fatigue strength and wear resistance induction hardened crankshaft has been developed for diesel engines. Crankshafts for use in diesel engines must be engineered to tolerate the high loads generated by high in-cylinder pressures, and be capable of resisting wear caused by the carbon which collects in the lubricating oil as a combustion by-product. Simultaneous hardening of the shaft and the fillet has been adopted in the newly developed crankshaft to achieve high strength while reducing the number of production processes, resulting in the development of a crankshaft with excellent fatigue strength, resistance to wear, and mass producibility. A special material was developed for the crankshaft to enable the curvature occurring during induction hardening of the fillet to be easily corrected. In addition, control of inclusions in materials has enabled the lead component, conventionally added to increase machinability, to be removed without sacrificing workability.

1. まえがき

今日、自動車の環境負荷低減に対する要望は更なる高まりを見せている。その中でCO₂排出規制の観点からディーゼルエンジンに対する期待は大きい。

ディーゼルエンジンはガソリンエンジンと比較して筒内圧が高く、クランクシャフトへの負荷は特に曲げの負荷が高い。またガソリンエンジンでは問題とならなかった潤滑油中への燃焼生成物(カーボン)の混入が生じることから軸摺動部の耐摩耗性が必要である。そこでこれらに対応が可能なクランクシャフト用の材料、熱処理技術の開発が必要となった。

2. 開発のねらい

ディーゼルエンジン用クランクシャフトとして高負荷に耐える高強度化の手法としては、素材および熱処理による強化等があり、従来から様々な強度向上手法が適用されている⁽¹⁾。

Fig. 1 に従来量産されている乗用車用の高周波焼入れクランクシャフトの例を示す。高周波焼入れクランクシャフトの多くは耐摩耗性を向上させる目的で軸部に高周波焼入れを行い、フィレット部は疲労強度を確保するためローラバニッシュ加工を施している⁽¹⁾。ローラバニッシュ加工はフィレット部を強化するために有効であるが、圧縮残留応

力により疲労強度が向上するので、高硬度材料でないと十分な残留応力が得られず、疲労強度の向上も望めない。このため加工性の悪い材料を適用せざるを得ない。また、軸部の熱処理とフィレット部のローラバニッシュの2工程が必要となり、加工設備が増えるといった課題もある。そこで本開発では Fig. 1 に示したようにフィレット部の高疲労強度化と生産工程短縮化の両立を目的にフィレット部焼入れ仕様とし、Fig. 2 に示す様に一般的な高周波焼入れクランクシャフト加工ラインに対し短い加工工程となることを目指した。フィレット部を同時に焼入れることにより更なる高疲労強度が得られるものの、焼入れ時に熱処理ひずみによる軸曲りを生ずるという課題がある。熱処理ひずみはクランクシャフトの剛性を高くすることで制御できるが、これに伴って重量も増加してしまう。焼入れ時の軸ひずみを矯正可能であれば軽量なクランクシャフトができる。これを具現化するために加工性や焼入れ性、加えてフィレット焼入れ仕様の大きな課題である軸曲り矯正を考慮したクランクシャフト材料を新規に開発することを目指した。同時に

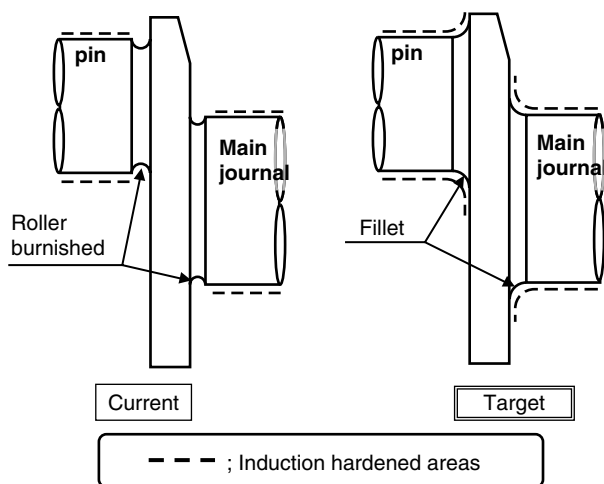


Fig. 1 Feature of the target crankshaft

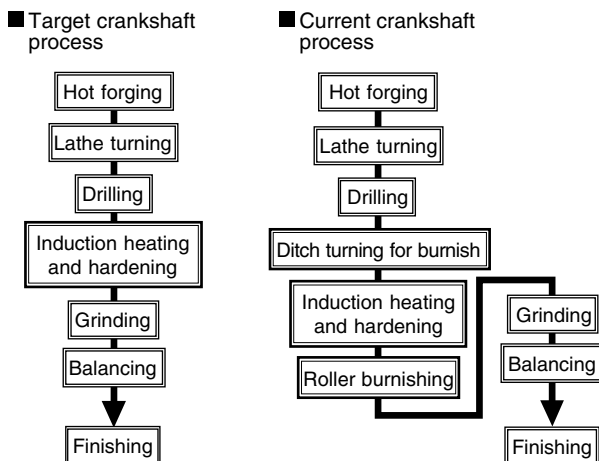


Fig. 2 Production process for induction hardened crankshaft

鉛添加に代替する被削性向上技術を用いることで環境負荷低減を図った。

3. 材料仕様

ディーゼルエンジン用に量産されている高周波焼入れクランクシャフト用材料の例としてバナジウムV添加非調質型材料がある⁽²⁾。この材料は熱間鍛造後の硬度が高く、工具や加工などの条件を最適化するためがあるので現有のクランクシャフト加工ラインで生産することができない。そこで次のような観点で材料を開発した。

3.1. 軸摺動部耐摩耗性

カーボンを混合した油を用いて、高周波焼入れをした試験片のオイルシール摺動軸部の磨耗試験を実施した。その結果を Fig. 3 に示す。オイルシールの軸追従特性から軸摩耗量の許容値を 50 μm 以下と定め、Fig. 3 において下限特性の傾きを用いることで必要な軸表面硬度を HMV580以上と定めた。また Fig. 4 に示す通り、実体クランクシャフトを高周波焼入れしたときの材料C量と表面硬度に相関性があることが確認されており、この関係から目標表面硬度を達成するためにC量を 0.37Wt%以上と設定した。

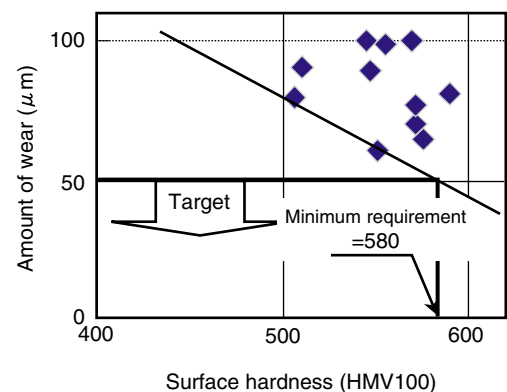


Fig. 3 Relation between surface hardness and amount of wear

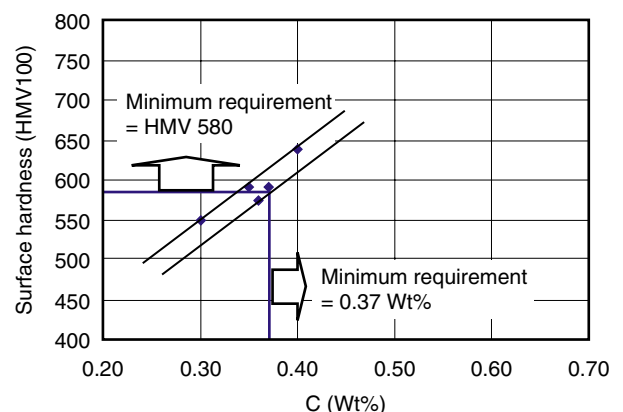


Fig. 4 Relation between amount of C and surface hardness

3.2. 生産性, 加工性, 被削性

鍛造後の素材硬度と炭素当量(Ceq)には相関性があることが報告されている⁽³⁾。

$$Ceq = C + \frac{1}{10}Si + \frac{1}{5}Mn + \frac{5}{22}Cr + 1.65V - \frac{5}{7}S$$

Fig. 5 に実体クランクシャフトにおける材料炭素当量と素材硬度の関係を示す。現有クランクシャフト加工ラインの加工条件を維持するために上限硬度を HRB98 とし、また実体クランクにおける疲労強度確保を目的に下限硬度を HRB85 とした。これより炭素当量を 0.54 ~ 0.60Wt% とした。また、一般的に焼入れ性向上元素として Si, Mn, Cr が知られているが、この中で疲労強度を向上させ、かつ素材硬度が上昇しない元素を検討した。Si はフェライト、パーライト組織においてフェライトを強化をすることで疲労強度を向上させるが、素材硬度の上昇は少ないことが報告されている⁽⁴⁾。本開発では Ceq の設定範囲を考え Si 量を 0.50Wt% と設定し、Mn を 0.60Wt% でバランスさせた。

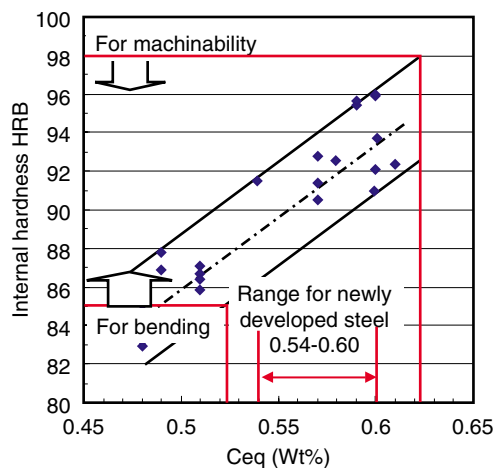


Fig. 5 Relation between amount of Ceq and internal hardness

3.3. 焼入れ性の向上

焼入れ性を向上、安定化させるために有効な焼入れ性向上元素として B を添加した。B は鍛造後の素材硬度を上げずに微量で焼入れ性を向上させることが報告されている⁽⁵⁾。鋼材中に N が含まれていると BN を生成してしまい、固溶 B が減少してしまう。そこで固溶 N を低減するために Ti を添加して、N を固定することにより固溶 B を確保した。

3.4. 鉛フリー化

鉛代替の快削化方法として硫化物系介在物を微細分散させることが有効である⁽⁶⁾。これは材料中の硫化物を起点に加工中の切り粉の破碎性を向上させ、被削性を維持するものである。

以上、今回設定した材料組成を Table 1 に、Fig. 6 に材料ミクロ写真を示す。

Table 1 Chemical composition of newly developed steel

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ti	B	Pb	Ceq
0.39	0.50	0.60	<0.030	0.050	0.18	<0.08	Add.	-	0.57

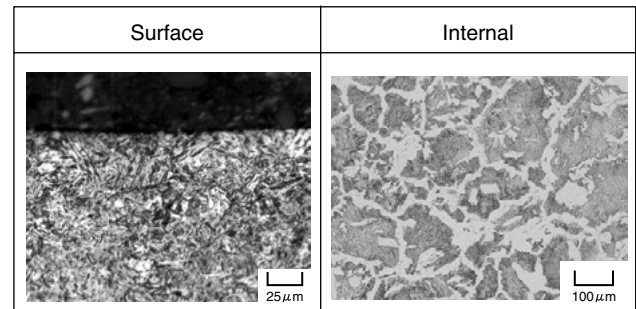


Fig. 6 Microstructure of crankshaft

4. クランクシャフト仕様

4.1. クランクシャフト強度の考え方

Fig. 7 に示す様に、クランクシャフトの中で強度的に重要な部分としてピン、ジャーナル軸フィレット部と潤滑油供給用孔(以下オイル穴)部がある。フィレット部は実機運転中の曲げ負荷に対して強度を要し、一方オイル穴部は捩じり負荷に対する強度を要する。

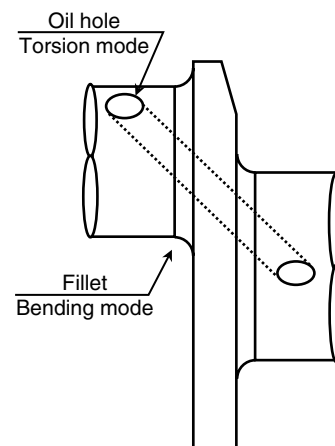


Fig. 7 Stress concentration point of crankshaft

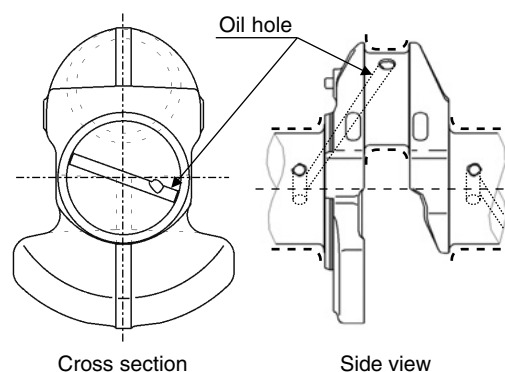


Fig. 8 Oil hole layout

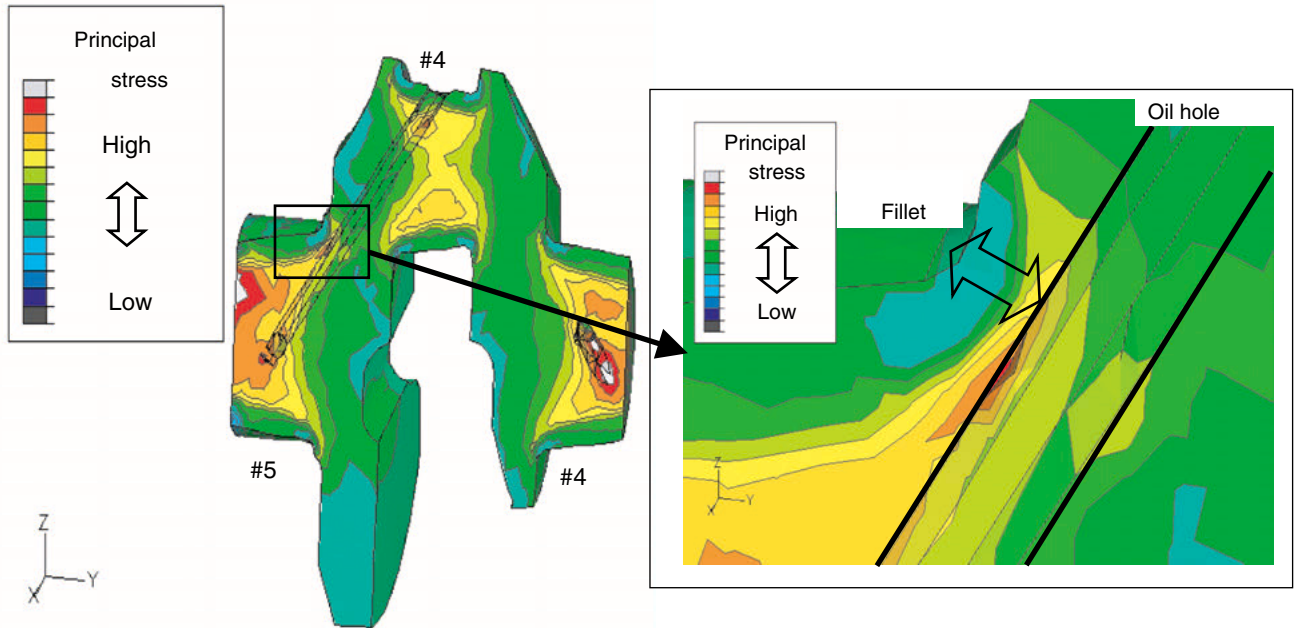


Fig. 9 Residual stress analysis around oil hole

まずフィレット部の疲労強度は有効硬化層深さを深くすることで高い疲労強度が得られることが知られている。しかし必要以上に深くすることは多くの熱エネルギーをクランクシャフトに与えることになり、曲りや伸びの原因となる。したがって要求する疲労強度を確保するための有効硬化層深さとして実機負荷に対応し最適な焼入れ深さを設定した。加えて、疲労強度の確保に重要なパラメータとして残留応力がある。Fig. 2 に示した通り、本開発クランクシャフトは高周波焼入れ後に軸摺動部の表面を仕上げるために研削加工を行う。この研削工程で発生する熱の影響で、焼入れ時に与えられた残留応力の開放が考えられる。このようなことから疲労強度と残留応力の関係を実験的に求めることで目標となる疲労強度を達成するための残留応力を設定し、管理基準とした。

次にオイル穴であるが、Fig. 8 に示す様にフィレット部近傍にあり、フィレットとオイル穴間の肉厚が薄くなる。フィレット部を焼入れると表面近傍はマルテンサイト組織であり、圧縮の残留応力が発生する。しかしフィレットから内部に向かうにつれてマルテンサイト体積分率は減少し、残留応力は圧縮から引張りに転じていく。引張りの応力場においてオイル穴のような切り欠き部位が存在すると初期クラックの発生が懸念されるのでCAEにより最適な肉厚確保を目指した。Fig. 9にオイル穴設計における残留応力場のコンタ図を示す。この結果をフィレットからの距離と残留応力(σ_1)およびマルテンサイト体積分率(ψ_M)の関係で整理したものが Fig. 10 である。フィレットからの距離が大きくなると引張りの応力が小さくなることが確認され、材料の降伏強度(σ_y)以下にするためにフィレットからの肉厚

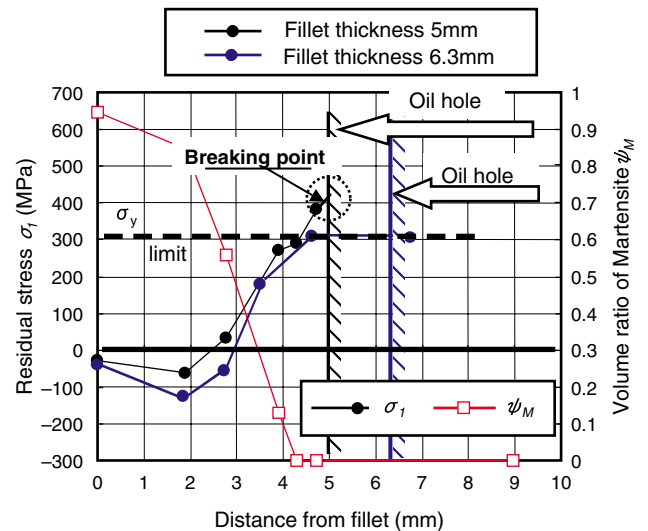


Fig. 10 Residual stress distribution around oil hole

を6.3mmと設定した。ただし疲労に対する強度検証が必要のため実体クランクシャフトにおける確認を行った。

4.2. 部品強度特性

前述の考え方に基づいて部品での強度試験により仕様を設定した。Fig. 11にクランクシャフトフィレット部の疲労試験を示す。試験には有効硬化層深さ、残留応力の値を変化させた実体クランクシャフトを用い、各パラメータと疲労強度の相関を求めた。有効硬化層深さと 10^7 疲労限の関係を Fig. 12 に、また残留応力と 10^7 疲労限の関係を Fig. 13 に示す。これらより目標強度を達成する有効硬化層深さと残留応力値を設定した。

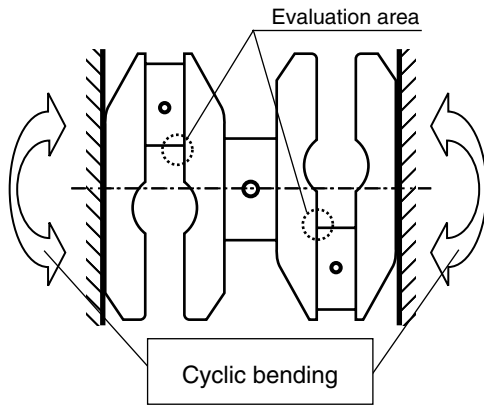


Fig. 11 Bending fatigue test for crankshaft

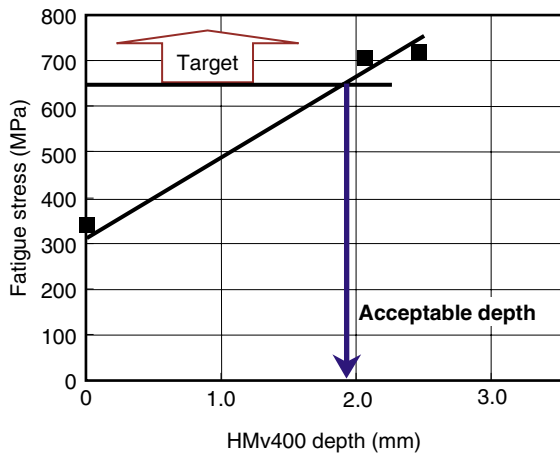


Fig. 12 Relation between depth of hardening and fatigue strength

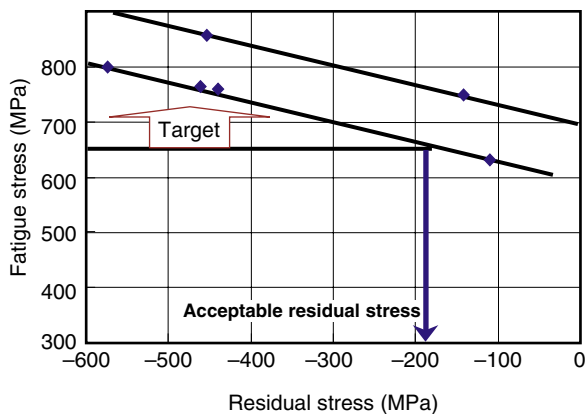


Fig. 13 Relation between residual stress and fatigue strength

次に Fig. 14 にオイル穴部の疲労試験を示す。CAE によりフィレット部肉厚を設定したクランクシャフトについて振じり試験した結果を Fig. 15 に示す。ここに示すように要求強度に対し十分な強度を確保していることが実証できた。

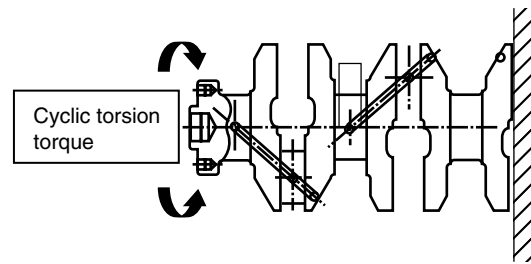


Fig. 14 Torsion fatigue test for crankshaft

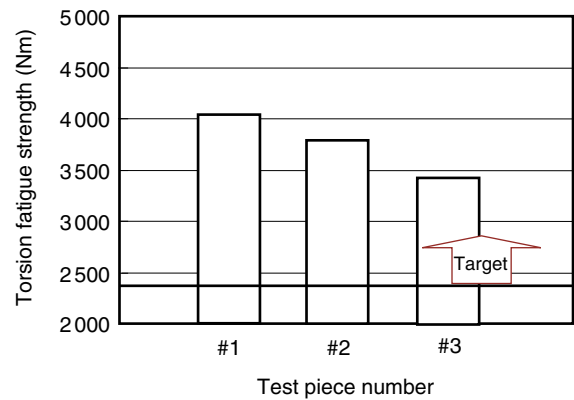


Fig. 15 Torsion fatigue test

4.3. 軸メタル摺動部耐摩耗性

これまでは軸メタル摺動部の耐摩耗性評価については実機エンジンでの耐久試験に依存していたが、材料特性と摩耗の関係を精度良く評価できないことが課題であった。そこで本開発の中で定量的に評価が行える単体試験手法を検討した。Fig. 16に単体試験機の概略を示す。試験機は潤滑油温度やサンプルの回転数を制御できる。また用いる潤滑油は実機ディーゼルエンジンオイル相当の擬似劣化油である。Fig. 17に各油中カーボン濃度における単体テスト時間と試験片の摩耗量の相関を示す。この結果において、油中カーボン濃度と 200 時間試験後の摩耗量の相関をまとめたものが Fig. 18 である。この結果、同一カーボン濃度における実機での軸摩耗量がほぼ等しいことがわかる。このことより本評価方法は実機エンジンでの軸摩耗を極めて短時

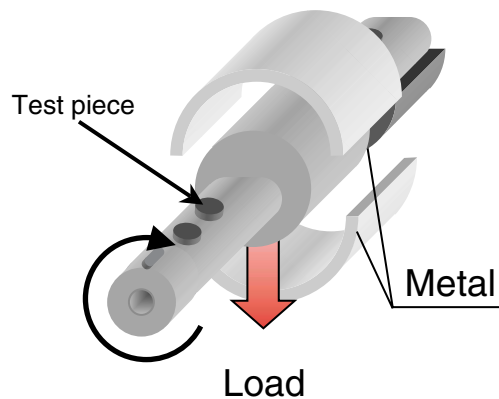


Fig. 16 Wear test of the shaft

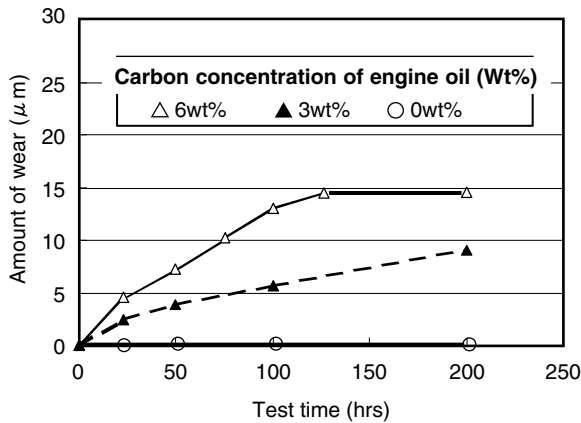


Fig. 17 Relation between test time and wear amount

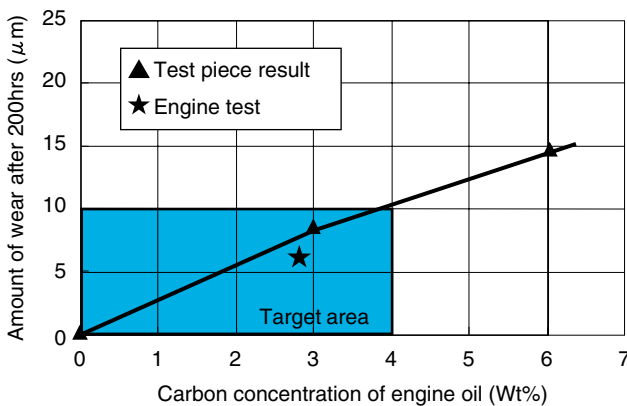


Fig. 18 Wear resistance test

間で再現可能な単体評価方法であることが確認された。本単体評価手法によって耐摩耗性に優れた材料および焼入れ仕様を設定することができた。

5. 生産技術

5.1. 軸曲り矯正

開発したクランクシャフトはフィレット部も焼入れしているので、焼入れ後の軸曲りが課題であった。この解決のために以下について検討した。

- 1) 焼入れ時の曲り低減
- 2) 曲り発生後の矯正

前者についてはフィレット左右の焼入れパターンの制御ならびにピン、ジャーナルの焼入れ順序と曲りの特性を実際のクランクシャフトを用いて試験し、最も曲り発生が少ない焼入れ条件とした。更に軸振れ精度を向上させるために焼入れ後の曲り矯正についても検討した。一般的には高周波焼入れの様に表面硬化処理をした軸に過度の矯正を加えると疲労強度が低下する可能性がある。また内部硬度が高いものは材料降伏点が高いため矯正を与えても十分な曲

り矯正ができない。しかし、開発材は軸矯正性を考慮して素材硬度を低く設定したことから矯正可能と考えた。クランクシャフトに曲り矯正を行い、疲労試験を行った結果を塑性ひずみと疲労強度維持率の関係で示したものがFig. 19である。この結果より疲労強度を維持できる限界の塑性ひずみを求め、これを軸矯正の限界として管理値に設定することとした。

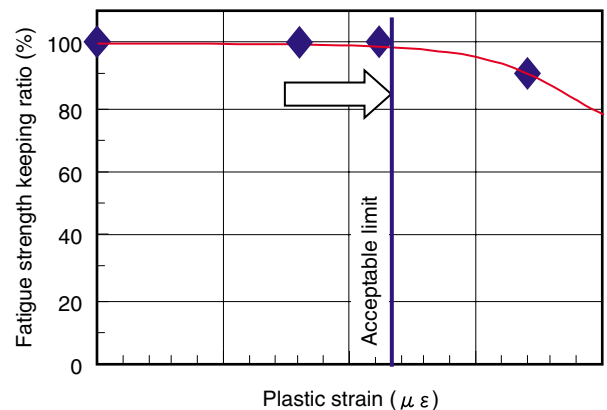


Fig. 19 Relation between plastic strain and fatigue strength

5.2. 機械加工性

本開発においては前述の通り従来から使用してきた被削性向上成分である鉛をフリー化している。本開発クランクシャフトの量産加工ラインにおいて鉛フリー材は初適用であったため、以下の項目について実際の加工ラインにおいて検証を行い、加工条件も技術改良を行った。

- 1) 工具送り条件、回転数の設定
- 2) 使用工具の吟味
- 3) 切削油条件

Fig. 20に加工工具の寿命について現有加工クランクシャフトに対する位置付けを示す。従来に対し加工効率を犠牲にすることなく鉛フリーを達成することができた。

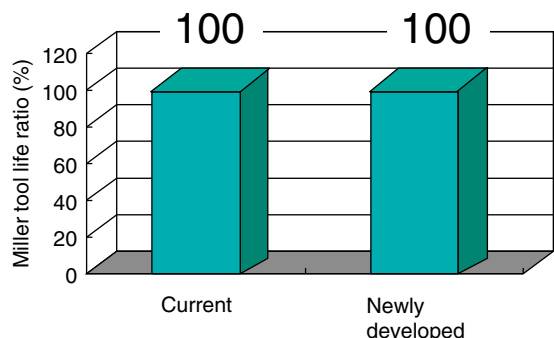


Fig. 20 Machinability result

6. まとめ

以上の知見により高強度で生産性に優れた高周波焼入れクランクシャフト開発することができた。

- (1)加工性、焼入れ性、軸矯正性を満足する材料を開発した。
- (2)材料中の硫化物介在物制御により、鉛成分のフリー化を達成した。
- (3)CAE により最適なオイル穴設計仕様を設定した。
- (4)フィレット焼入れ仕様を設定することで、一般的な乗用車用高周波焼入れクランクシャフトで採用されているローラーバニッシュ加工を廃止し、製造工程の短縮化を達成し、同時に高強度化を図れた。

尚、本クランクシャフトは今秋発売した欧州向けアコードに搭載されているホンダ自社開発のディーゼルエンジンに採用されている。

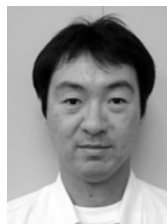
謝 辞

本開発にあたり、御協力を頂きました(株)住友金属小倉、住友金属工業(株)を始め社内外の関係者の方々に紙面を借りて厚く御礼申し上げます。

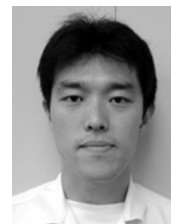
参考文献

- (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 (2001)
- (2) 濱崎 敦ら：当社の自動車用型鍛造品への取り組み，住友金属，Vol.48, No4, p.49 (1996)
- (3) 佐藤武史：非調質高強度鋼，住友金属，Vol.45, No.4, p.121 (1993)
- (4) 栗田真人，外山和男：フェライトーパーライト熱延鋼板の疲労特性に及ぼす強化機構の影響，鉄と鋼，Vol.80, No1, p.66 (1994)
- (5) 紅林 豊，中村貞行：冷鍛用B肌焼鋼，電気製鋼第，69巻1号，p.57 (1998)
- (6) 天孝篤志，諏方 悟：焼きならし処理省略可能なクランクシャフト用鉛フリー快削鋼の開発，Honda R&D Technical Review, Vol.14, No.1, p.141 (2002)

■ 著 者 ■



恩田 勇人



浅井 鉄也



藤木 賢治



工藤 洋嗣



室伏 和昌