論 説

高強度肌焼鋼の諸特性におよぼす Pb の影響
について

木村篤良*, 並木邦夫*, 中村貞行*

Influence of Lead on Properties of High Strength Case
-Hardening Steel

Atsuyoshi Kimura, Kunio Namiki and Sadayuki Nakamura

Synopsis

Influence of lead content on the machinability and mechanical properties of high strength case hardening steel which contains 0.5% of nickel and low silicon was examined. Addition of lead improves the machinability of the steel and the rate is in proportion to the content of lead. Lead has no effect on the fatigue and impact properties when the content is less than 0.042%, but deteriorates them by more addition. The influence of lead on the mechanical properties are discussed based on the size of lead inclusions.

1. 結 論

エンジンの出力上昇や部品の小型、軽量化にと
もない、浸炭して用いる肌焼鋼についても高強度
化すなわち耐衝撃性及び疲れ強さの向上が強く望
まれている。浸炭材の疲れ強さや靱性を改善する
ためには、Ni や Mo 含有量の増加と、S や P, Si,
Mn, Cr 含有量の減少が有効であり^{1,2)}、高強度歯
車用鋼として実用化されている³⁾。

一方、Ni を添加した高強度鋼は従来の肌焼鋼に
比べて被削性が劣り、切削加工の際に能率の低下
やコストの上昇をもたらすという欠点がある。従
来より、鋼の被削性改善のために S や Pb などの
快削元素の添加が行われており、肌焼鋼について

も快削鋼が使用されている。これらの元素は鋼中
に非金属あるいは金属介在物として析出して、被
削性を改善するが、同時に亀裂の起点となる可能
性がある。Pb の場合、引張強さが 100kgf/mm²以
下であれば疲れ強さに影響を与えないとされてい
る^{4,5)}。疲れ限度が約 80kgf/mm²である SCM420
浸炭焼入れ材の回転曲げ試験においても、Pb 含有
量が 0.20% 以下であれば疲れ限度に影響しないこ
ことを確認している⁶⁾。しかし、さらに高い疲れ強さ
のレベルで、Pb の影響を論じた報告は見あたらない。
本研究では、含 Ni 高強度肌焼鋼の被削性、疲
れ強さ、衝撃値におよぼす Pb 含有量の影響につ
いて実験を行い、さらに Pb 介在物の大きさの影
響についても考察した。

2. 実 験 方 法

2.1 試 験 材 料

試験に用いた材料は、0.5% の Ni を含有する高

1989年 5 月 8 日 受付

*大同特殊鋼㈱研究開発本部

Table 1. Chemical composition of tested materials. (wt%)

Steel	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	Pb
A	0.24	0.09	0.69	0.011	0.002	0.05	0.50	1.00	0.32	—
B	0.25	0.08	0.70	0.010	0.002	0.02	0.48	1.00	0.32	0.017
C	0.25	0.08	0.69	0.009	0.002	0.02	0.49	0.99	0.32	0.027
D	0.24	0.08	0.68	0.006	0.002	0.02	0.49	0.98	0.32	0.042
E	0.24	0.07	0.69	0.010	0.002	0.02	0.50	0.99	0.32	0.047
F	0.20	0.26	0.82	0.021	0.017	0.09	0.08	1.16	0.15	—

Fig. 1. Processing of tested materials.

強度歯車用の肌焼鋼に0.05%以下の範囲の Pb を添加したものである。Table 1 に試験材料の化学成分を示す。粒界を脆化する元素である P や非金属介在物として機械的性質を劣化させる S、浸炭処理時に粒界酸化を助長させる Si と Mn の含有量を低くしている。一方、浸炭部や芯部の靱性を改善するために Ni と Mo を添加している。また、芯部の硬さを確保するために C 含有量を0.25%に

高めている。比較のために SCM420 に相当する鋼 F も試験に供した。

これらの材料は全てアーク炉で溶解し、炉外精錬の後 2.5t の鋼塊に铸造した。さらに、熱間圧延により直径 90mm の丸棒に加工した。この丸棒から各種試験片までの加工工程を Fig. 1 にまとめる。超硬工具による旋削試験とハイスホブによる歯切り試験は焼ならし処理を実施した 90mm の

Table 2. Cutting conditions in machinability tests.

	Drilling	Turning	Hobbing
Tool	HSS SKH51 5mm dia.	Carbide P10 -5, -5, 5, 5, 30, 0, 0.4	HSS M34, 92mm dia. m2.5, 3 threads
Feed (mm/rev)	0.10	0.20	4mm/work rev.
Depth of cut (mm)	20(blind hole)	2.0	—
Cutting speed(m/min)	Variable	150, 200	60
Cutting fluid	Non (dry)	Non (dry)	Cutting oil
Tool life criterion	Tool failure	$V_B = 0.2\text{mm}$	$V_B = 0.3\text{mm}$
Work size	90mm dia. 400mm length	40mm dia. 50mm length	31 teeth 82.5mm dia. 200mm length

圧延材を用いた。ハイスドリルによる穴あけ試験には 40mm に鍛造後、焼ならし処理を施した材料を用いた。回転曲げ疲れ試験とローラピッチング試験は、圧延丸棒を直径 30mm の丸棒に鍛造し、これから試験片を切り出し、浸炭焼入・焼戻し処理の後、試験に供した。歯車の疲れ試験と衝撃試験に用いた歯車は、焼ならし処理を施した圧延材から直接機械加工を行い、浸炭焼入・焼戻し処理を行った。各試験片の焼ならし処理と浸炭焼入処理の条件は Fig. 1 の中に示した。

2.2 試験条件

切削試験における切削条件を Table 2 に示す。旋削加工寿命試験では、超硬合金 P10 種の工具を用いて加工を行い、フランク摩耗幅 0.2mm を基準として工具寿命を求めた。ドリル寿命試験では、ハイスのドリルを用いて穴の加工を行い、工具が折損または溶損するまでに加工した穴の総深さを工具寿命値とした。ホブによる歯切り試験では、モジュール 2.5 の 3 条ホブを用い、横逃げ面の最大摩耗が 0.3mm になるまでに加工した総歯幅と歯数の積を工具寿命値とした。

回転曲げ疲れ試験は平滑部直径 8mm の小野式疲れ試験片を用いて回転数 3 500rpm で実施した。ローラピッチング試験は直径 26mm の浸炭材（浸炭まま）を面圧 375kgf/mm²、滑り率 -40%、回転数 1 500rpm で行った。同一条件で 4 回試験を実施した。歯車疲れ試験と歯車衝撃試験に用いた試験歯車はモジュール 2.5 の平滑歯であり、歯数 28 と 32 の二種類の歯車を対にして試験を行った。

歯車衝撃試験では衝撃荷重の最大値を求め、これを 5 回繰り返した。

直径 90mm の圧延材の長手方向に平行に切り出したサンプルを研磨し、Pb 介在物の分布を測定した。X 線マイクロアナライザを用いて 800 倍の反射電子線組成像を撮影し、画像解析装置を用いて 300 個の Pb 介在物の大きさの分布を調べ、大きさの代表値として、円相当径を求めた。

3. 結果と考察

3.1 被削性

ハイスドリルによる加工における切削速度と工具寿命の関係を求め、 $V_{L=5\ 000}$ 、すなわち工具寿命が 5 000mm になる切削速度を計算した。 $V_{L=5\ 000}$ はドリル加工能率を表す指数となる。Pb 含有量と $V_{L=5\ 000}$ の関係を Fig. 2 に示す。Pb 含有量の増加に伴い $V_{L=5\ 000}$ が上昇し、Pb を含有しない A 鋼を基準にすると、0.03% の Pb の添加により $V_{L=5\ 000}$ は約 1.3 倍に、0.05% で 1.6 倍に改善される。同図において、A 鋼は浸炭用鋼として多く使用されている F 鋼に比べて $V_{L=5\ 000}$ が低いことが、これは硬さが高いことが主たる原因と考えられる。A 鋼に 0.02% 以上の Pb を添加することにより、F 鋼以上の水準まで改善される。SCM420 鋼の $V_{L=5\ 000}$ におよぼす Pb 含有量の影響に関して、すでに報告したが⁶⁾、それによると、Pb 含有量が 0.1% 以下の範囲ではそれ以上の範囲に比べて被削性改善効果が大きく、Pb 含有量 0.08% で $V_{L=5\ 000}$ は約 1.8 倍に上昇し、今回の結果とほぼ対応している。

Fig. 2. Influence of lead content on tool life speed in drilling.

Fig. 4. Influence of lead content on tool life in hobbing.

Fig. 3. Influence of lead content on tool life in turning with carbide tool.

超硬工具による旋削加工時の工具寿命と Pb 含有量の関係を Fig. 3 に示す。超硬工具寿命に対する Pb の効果はハイスドリルの場合より小さく、寿命速度で表現できるほどではなく、縦軸に工具寿命そのものを選んである。切削速度 150m/min と 200m/min の両条件とも Pb 含有量の増加に伴い工具寿命が改善され、0.03% の Pb の添加により約 1.7 倍に延長される。F 鋼に比べると Ni を含有する A 鋼は工具寿命が短い、A 鋼に 0.03% 以上の Pb を添加することにより、A 鋼と同等以上の工具寿命を得ることが可能である。

Fig. 4 にハイスホブによる歯切り試験における工具寿命と Pb 含有量の関係を示す。この場合も、ドリル加工や超硬旋削加工の場合と同様に、Pb 含有量の増加に伴い延長される。0.03% の Pb の添

加による工具寿命の改善は約 1.9 倍であり、超硬旋削加工の場合とはほぼ一致している。また、微量の Pb の添加によって F 鋼と同等以上の工具寿命が得られる。

以上のように、A 鋼に微量の Pb を添加することによって、被削性が改善され、本実験の Pb 含有量が 0.05% 以下の範囲では、片対数グラフ上で直線的に向上することが明らかになった。加工様式によって若干の違いはあるが、A 鋼に 0.03% の Pb を添加した鋼は JIS SCM420 鋼 (F 鋼) と同等の被削性を有することが明らかになった。したがって、0.04% 以上の Pb を添加すれば、F 鋼より優れた被削性を得ることが可能である。

3.2 強度

小野式回転曲げ疲れ試験と歯車疲れ試験における 10^7 疲れ限度と Pb 含有量の関係を Fig. 5 に示す。回転曲げと歯車では疲れ限度の絶対値が異なるが、どちらの場合も、Pb 含有量が 0.042% 以下の範囲では疲れ限度はほぼ一定であり、Pb 添加による悪影響は現れていない。Pb 含有量が 0.047% の E 鋼は疲れ限度が約 7kgf/mm² 低下している。A 鋼は F 鋼に比べて疲れ限度が高く、その差は回転曲げ疲れ試験の場合で 8kgf/mm²、歯車疲れ試験の場合 14kgf/mm² である。したがって、0.042% 以下の範囲であれば、A 鋼に Pb を添加しても疲れ強さは低下せず、被削性を改善することが可能である。

従来、SCr420 鋼や SCM420 鋼に Pb を添加しても、浸炭材の疲れ強さは低下しないと報告されている⁶⁾。しかし、今回の試験の結果では、0.047

Fig. 5. Influence of lead content on fatigue limit in rotating bending test and gear fatigue test.

Fig. 6. Influence of lead content on the diameter of lead inclusions.

%のPbの添加により疲れ限度が低下している。この原因について考察する。SCr420鋼やSCM420鋼の浸炭処理材には表面に通常10~20μmの粒界酸化層が観察される。この粒界酸化層はSiやMn, Crなど酸化物形成元素が多いほど深くなる傾向がある。本実験で用いたA~E鋼はこれらの元素を低くしているため、粒界酸化層の深さは約5μmであった。粒界酸化は疲れの起点となるので、粒界酸化層の深さが増加すると疲れ強さが低下する。また、A~E鋼はNiとMoを付加して浸炭層の破壊靱性を向上させている。A鋼がF鋼に比べて疲れ強さが優れているのはこのためである。一方、Pbを添加すると金属Pb介在物が生成する。B~E鋼とSCM420鋼にPbを0.09%と0.20%添加した材料のPb介在物の大きさを測定し、Pb含有量との関係をFig. 6に示した。300個の介在物の平均粒径と最大粒径を示している。どちらもPb含有量が増加すると大きくなる傾向にある。特に最大粒径は、Pb含有量が0.047%以上で急激に粗大化している。粒界酸化層の深さと比較すると、SCM420鋼の場合、0.2%のPbを添加した材料のPb介在物の最大粒径は19μmであり、粒界酸化層の深さと同程度である。一方、低SiのB~E鋼の粒界酸化層は約5μmであるが、Pb含有量が0.042%以下の範囲ではPb介在物の最大粒径はこれより小さい。Pb介在物も破壊の起点と成り得るが、その程度が粒界酸化の場合と同程度であると仮定すると、SCM420鋼の場合は粒界酸化層が深く、Pbを添加しても、これより微細

な介在物になるので、疲れ強さは低下しないものと考えられる。一方、低Si鋼は粒界酸化層が浅く、疲れ強さが高いが、Pbを多量に添加すると生成するPb介在物の大きさが粒界酸化層よりも大きくなり、疲れ強さを低下するものと考えられる。粒界酸化層は表面であるが、Pb介在物は内部にも存在する。表層の欠陥と内部の欠陥では応力集中に対する寄与率が異なり、さらに粒界酸化とPb介在物の亀裂起点としての有害性の程度については定量的なデータがないので、これ以上の詳細な考察はできないが、本実験で用いた高強度肌焼鋼の強度レベルまで高強度化すると、10μmのPb介在物も亀裂の起点となるものと考えられる。Photo. 1はE鋼の回転曲げ疲れ試験において、疲れ限度の直上の応力で試験した試験片の破面に観察された亀裂起点の介在物であり、Pbが測定されている。大きさもFig. 5の最大粒径に相当しており、上記の考え方に矛盾のないことを示している。

歯車衝撃試験における衝撃荷重とPb含有量の関係をFig. 7に示す。5回の試験のデータの範囲と平均値を示している。A鋼はF鋼に比べて衝撃荷重が高いが、これは疲れ強さの場合と同様、粒界酸化層が浅いことと、マトリックスの破壊靱性が高いためである。A鋼にPbを添加すると0.042%までは衝撃強度を低下しないが、0.047%のE鋼はわずかに低下している。しかし、疲れ強さの場合にはF鋼に近い水準まで低下するのに対して、衝撃荷重の場合にはF鋼の2倍近い値を維持している。E鋼の衝撃強さが低下する理由としては疲

Photo. 1. Lead inclusion at the crack initiation site in rotating bending fatigue test of Steel E.

れ強さの場合と同じものが考えられるが、その程度が小さいのは、Ni と Mo の付加による破壊靱性改善の効果が Pb 介在物の悪影響より大きいためであると考えられる。したがって、さらに Pb 含有量を増加すると F 鋼のレベルまで衝撃強さが低下する可能性がある。

浸炭材のローラピッチング試験における寿命と Pb 含有量の関係を Fig. 8 に示す。A 鋼と E 鋼を比較すると、わずかながら A 鋼の方がピッチング寿命が長い。含有量が 0.047% 以下の本実験の範囲では、Pb はピッチング強度に影響しない。Pb は 600kgf/mm² という高面圧下ではピッチング強度を低下することがよく知られているが⁹⁾、本実験では、375kgf/mm² という面圧であるために Pb の影響がほとんど現れなかったものと考えられる。

以上のように、約 0.04% 以下の範囲であれば低 Si 含 Ni 系の高強度肌焼鋼に Pb を添加しても疲れ強さや衝撃強さ、ピッチング寿命に影響のないことが確認された。切削試験の結果と合わせて、0.03~0.04% の Pb を添加した高強度肌焼鋼はベース鋼と同等で、SCM420 鋼より優れた強度と SCM420 鋼と同等の被削性を有することが明らかになった。

Fig. 7. Influence of lead content on gear impact load.

Fig. 8. Influence of lead content on life in roller pitting test.

4. 結 論

浸炭処理による粒界酸化を防止し、破壊靱性を改善するために、Si と Mn を減少し、Ni と Mo を増加した高強度肌焼鋼の被削性と強度におよぼす Pb の影響を試験し、以下の結論を得た。

(1) Pb 含有量の増加にともない、ハイスドリル加工性や超硬工具寿命、ハイスホブ寿命は改善される。SCM420 鋼と同等の被削性を得るためには 0.03% 以上の Pb を添加することが必要である。

(2) 高強度肌焼鋼に 0.042% 以下の範囲で Pb を添加しても、浸炭材の疲れ強さ、衝撃強さは低下しない。これ以上の Pb を添加すると低下する傾向が認められる。SCM420 鋼の場合には約 0.2% の Pb を添加してもこれらの特性は低下しない。この差は、SCM420 鋼はすでに破壊の起点と

なる粒界酸化層が深く、Pb 介在物の大きさがこれと同等以下であるのに対して、高強度肌焼鋼は粒界酸化層が浅く、多量の Pb を添加すると亀裂の起点となりえる粗大な Pb 介在物が生成するためであると考えられる。

(3) Pb を0.03～0.04%を添加した高強度肌焼鋼は SCM420 鋼より優れた疲れ強さと衝撃強さ、ビッチング強さなどの強度特性を有すると同時に、SCM420 鋼と同等の被削性を兼備している。

(文 献)

- 1) 礒川憲二, 並木邦夫: 電気製鋼, 57 (1986) 1, 4
- 2) 礒川憲二, 並木邦夫: 電気製鋼, 57 (1986) 1, 13
- 3) 並木邦夫: 熱処理, 28 (1988) 4, 227
- 4) 浅田千秋, 藤原達雄, 福井彰一: 49 (1963) 10, 1492
- 5) 日本学術振興会製鋼19委員会編: 鉄鋼と合金元素 (F), (1966), 90, [誠文堂新光社]
- 6) 木村篤良, 中村貞行: 電気製鋼, 57 (1986) 1, 51