UDC 669.14.018.23 : 669.15.891-194
621.941.02 : 539.375.6

Ca 快削鋼切削時に生ずる Belag の 工具摩耗に及ぼす効果*

伊 藤 哲 朗** 加 藤 剛 志**
吉 田 鎮 雄*** 木 村 篤 良***

Effect of Belag for Tool Abrasion during Machining of Ca Bearing Free-Cutting Steel

Tetsurô Itô, Kôshi Katô, Shizuo Yoshida
and Atsuyoshi Kimura

Synopsis

A study has been made about behavior of belag for tool abrasion when Ca bearing free-cutting steel is machined.

(a) Composition of belag is different from that of inclusions and is varied by cutting speed.

(b) The limitation of cutting speed which makes the effect of belag lost is remarkably dominated by the type of inclusion and Ca itself also gives influence to the said limitation.

(c) Belag has barrier effect for crater abrasion and lubricating effect.

(d) Continuous supply of composition of inclusion ($\text{CaO}-\text{MnO}-\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3$) is necessary condition for keeping anti-abrasion of belag constantly in machining materials.

1. 緒 言

Ca 快削鋼の被削性に関する研究報告は数年前西独で発表されて以来、国内の主たる官公立研究機関、製鋼メーカーで報告されていないところがないほど盛んに研究が行なわれ、すでに商品として機械工業方面に出まわっており、今後ますます期待され得る快削鋼と思われる。しかし、Ca 快削鋼は従来の快削鋼とは異

なり、脱酸に用いる合金の種類、添加量、酸素コントロール、さらに適正な鋼中介在物のコントロール等冶金学的にむつかしい内容をもつため各製造元によりその特質を異にする場合が多いのが現状である。

本報告は過去の数多くの報告では見当らず、しかもその重要度は大きいと考えられる Belag 中の CaO の被削性におよぼす役割、Belag の生成状況ならびに生成した Belag の耐摩耗性とその生成要因である鋼中に存在する含 Ca 酸化物系介在物の形態、組成との関係等について述べる。

2. 実 験 方 法

2.1 試 験 材

昭和47年3月11日受付

* 昭和45年度精機学会秋季大会
昭和46年度精機学会春季大会 } にて発表

** 大同製鋼(株)研究開発本部中央研究所, 工博

*** 大同製鋼(株)研究開発本部中央研究所

Table 1. Chemical composition, hardness and condition of heat treatment of material cut.

Mat. Cut	Heat No.	Chemical composition(%)									Hardness (H _B)	Condition of heat treatment
		C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Ca		
A-1	ZN451	.45	.26	.65	.021	.014	.15	.06	.13	.0056	192	850°C×2hr AC
A-2	ZN447	.46	.21	.68	.016	.010	.10	.08	.14	.0012	207	〃
B-1	Z1710	.47	.28	.66	.016	.015	.16	.09	.12	.0054	198	〃
B-2	ZD465	.43	.26	.65	.016	.017	.15	.07	.12	.0006	195	〃
C-1	L3549	.47	.26	.68	.015	.016	.15	.07	.10	—	192	〃

試験材は2号AFで溶製したS45C相当鋼でCa-Si合金で脱酸し、含Ca介在物形態をA₂系およびC系に調整したもの、Fe-Si脱酸し、A₂系およびC系に調整したもの、さらに比較材としてAl脱酸した通常の工程材である。それぞれ1.3号鋼塊から直径100mmの丸棒に圧延した後、焼ならし、黒皮除去して試験に供した。

Table 1 にその化学成分、熱処理法および硬さを示す。

2.2 非金属介在物の測定

試験材中の酸化物系介在物の組成と形態を調べるため、下記の方法で測定した。

a) 酸化物介在物の組成; E. P. M. A. による定量分析測定条件

加速電圧; 20kV

試料吸収電流; 0.15~0.20μA

ビーム径; 2μφ

X線取り出し角; 20°

b) 酸化物介在物の形態; Q. T. M. による測定
測定項目; 面積率, 個数, 平均長さ, 平均巾

2.3 切削試験

切削試験は下記の3項目について実施した。

a) 切削抵抗

b) 切削温度

c) 工具寿命

それぞれの試験に用いた試験条件を Table 2 に示す。

a) の試験からの各応力, ひずみ等の算出には下記の単一せん断面理論を用いて計算した。

$$\tau_c = (F_c \sin \alpha + F_t \cos \alpha) / t \ell$$

ここで F_c : 主分力, F_t : 送り分力, t : 切込み, ℓ : 工具切くず接触長さである。

b) の試験は工具と被削材の熱電対法を用い、温度

Table 2. Cutting condition, tool testing machine and apparatus.

Lathe	Okuma machi. LS450×800 15HP
Measurement of cutting forces	Cutting tool dynamometer DM-3 dynamic strainmeter Pen recorder
Measurement of cutting temperature	Workpiece-tool thermocouple method with compensating circuit
Cutting condition	Tool mat.: P10 Tool geom.: -5, -5, 5, 5, 30, 0, 0.4 Feed: 0.2mm/rev Depth of cut: 2mm Cutting speed: 20-500m/min

Fig. 1. Method of measuring cutting temperature with compensating circuit.

補償には K. J. Trigger¹⁾ の補償回路法を用いた。その概要を Fig. 1 に示す。理論切削温度の算出は M. C. Show の式²⁾ によった。

3. 実験結果

3.1 非金属介在物測定結果

試験材の非金属介在物の Q. T. M. による測定結果を Table 3 に示す。A-1, A-2 の酸化物系介在物の長さ $\bar{L}$ と巾の平均の比, $\bar{L}/\bar{W}$ は大きく、熱間圧延により展伸していることがわかる。B-1, B-2 の $\bar{L}/\bar{W}$ はやや小さい。

Table 3. Results of measurement of non-metallic inclusions in steels with Q. T. M.

Mat. Cut	Chemical composition of oxide inclusion (%)				$\bar{L}(\mu)$	$\bar{W}(\mu)$	$\bar{L}/\bar{W}$	Type of inclusion by JIS
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MnO				
A-1	26.5	40.5	32.0	1.0	12.2	1.2	10.2	A ₂
A-2	29.3	45.3	11.8	13.5	15.2	1.2	12.7	A ₂
B-1	25.6	34.6	39.1	0.7	12.0	2.1	5.7	C(A ₂)
B-2	2.3	88.1	9.6	0	13.0	1.7	7.6	C(B)
C-1	0.098	0.018			3.5	3.0	1.2	B(C)

光学顕微鏡による観察ではA-1, A-2の介在物はA₂系で、B-1はC系主体でA₂系をも含み、B-2はC系主体でB系のものもあった。

Photo. 1 にそれぞれの代表的な酸化物系介在物を示す。

Table 4 はこれらの介在物を E. P. M. A. で分析した結果を示す。A-1, B-1はCaO-Al₂O₃-SiO₂系であり、A-2はMnO(CaO)-Al₂O₃-SiO₂系である。B-2はAl₂O₃が大部分で、比較材とよく似ている。

ここでA-1, A-2の介在物形態をA₂系、B-1, B-2のそれをC系と称し、後の解析に用いた。

3.2 Belag 組成と切削速度との関連性

Belag の生成は工具材種、切削速度からもっとも影響を受ける³⁾。工具材種P10を用いた場合のBelag生成に及ぼす切削速度の影響について Fig. 2 に示す。これは切削量を一定 ($1.6 \times 10^5 \text{ mm}^3$) とした場合のBelagの生成状況であり、切削速度が異なっても介在物が工具刃先にあたる量は一定の場合である。

図からA-1, A-2, B-1についてはある切削速度までBelagが生成し、クレータ摩耗 (K_T) の発生を防止していることからBelagの工具摩耗に対する効果は認められる。B-2についてはBelagの

Table 4. Chemical composition of oxide inclusions in steels analyzed with E. P. M. A.

Mat. Cut	Chemical composition of oxide inclusion (%)			
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MnO
A-1	26.5	40.5	32.0	1.0
A-2	29.3	45.3	11.8	13.5
B-1	25.6	34.6	39.1	0.7
B-2	2.3	88.1	9.6	0

Fig. 2. Effect of cutting speed on development of belag and crater at tool surface.

堆積層は検出できなかったが、C-1に比べ、K_T発生速度が約50m/min高速側になっていることは若干のBelag生成はあったものと推定される。事実、後のE. P. M. A. 分析においては若干検出している。

A-1, A-2, B-1に比し、B-2のBelag効果がほとんどみられないのはB-2の介在物組成がAl₂O₃主体のため、Belagとなる介在物が少ないためと考えられる。

介在物形態からみると一般にA₂系はC系より切削速度が低い領域でBelagの付着がみられ、かつBelag

A - 1

A - 2

B - 1

B - 2

Photo. 1.

Typical inclusions
in the materials A-1,
A-2, B-1 and B-2.

の付着しなくなる限界速度も低い。それぞれの試験材に対し、クレータ発生後の K_T と速度の関係は比較鋼 C-1 のそれと変わらないことから工具面上に酸化物が堆積することなく、流れてしまった場合は、工具摩耗防止効果はまったくなくなることがわかる。

Fig. 3 は Belag の組織と切削速度の関係を示し

たもので、Ca量、介在物形態に関係なく SiO_2 , MnO は切削速度が高くなると共に減少し、 CaO , Al_2O_3 は逆に増加することを示している。しかし Ca 量、介在物形態により Belag 中の各成分の各切削速度における割合には差がある。これは被削材中での介在物組成に差があるためである。切削速度に対する Belag 組

Fig. 3. Relation between belag composition and cutting speed with cemented carbide cutting tool P10.

成は一定でなく、 $\text{CaO}-\text{MnO}-\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3$ のいくつかの組合せがあるが、その切削速度に応じた切削温度に対するそれらの物理的性質（融点、軟化温度等）はほぼ同じと考えられる。

Fig. 4 は工具すくい面の元素分布の一例で、被削材A-2を切削速度 150m/min, 送り 0.2mm/rev, 切込み 2.0mm, 工具P10の条件で切削した際のもの

である。

Ca はクレータ後方でも前方寄りに多く、その後方ではやや少ない。しかし、MnはこのCaの少なくなった部分に多い。AlはCaと同傾向であり、Siは全般に分布している。すなわち、上述した Belag 組成と切削速度の関係と同じ傾向が工具すくい面上の元素分布と温度分布の関係においても見られる。

Fig. 4. Distribution of chemical elements on the tool-chip contact surface of sample A-2 at cutting speed 150 m/min, feed 0.2 mm/rev and depth of cut 2.0 mm.

3.3 Belag 組成と切削温度の関連性

Fig. 5 は切削速度と実測切削温度の関係である。切削速度が 200m/min (切削温度 800°C) 以下では供試材間の差についてあまりはっきりした傾向はみられないが、これ以上の切削速度では Ca 量の多い場合、切削温度は比較鋼に比べ、かなり低くなる。先に Fig. 2 で求めた Belag の工具摩耗に対する効果が

Fig. 5. Relation between cutting speed and cutting temperature.

Fig. 6. Relation between calcium content in material cuts and limited cutting temperature, that belag on tool surface is disappeared.

なくなる切削速度 (限界切削速度) と Fig. 5 から Ca 量と限界切削温度との関係を求めたものが Fig. 6 である。A₂系、C系ともに Ca 量の増加により限界切削温度は上昇する。C系については増加率は大きく、高温での Belag 効果を A₂系より大きくする。A₂系については低温側での Belag 効果が大きく、高温側に移動すると C系より悪くなる。また Ca 量が少ない場合は A₂系がまた逆に Ca 量が多い場合は C系の限界温度が高い。このことから Belag の効果のなくなる限界温度は介在物形態に大きく左右されるが Ca 量も影響していることがわかる。

Fig. 7 は工具-被削材間に発生した切削温度が工具すくい面で切くずに流入する熱量割合を算出したもので、切削速度 100m/min 以上ではほぼ全試験とも同一であり、Belag の生成によって Ca 快削鋼の切削エネルギーの切くずへの流入割合は変動しない。しかし、切削速度が 100m/min 以下になると比較鋼に

Fig. 7. Relation between cutting speed and heat content flowed into chip on tool-chip interface.

比べ Ca 快削鋼では若干低く、このことは被削材もしくは工具に流入する割合が大きくなることを意味しているが、被削材についてはその割合の変動は考えにくいことから工具に流入する割合が大きくなると考えられる。Belag は先の結果から 100m/min 以下でも A₂系については十分考えられることから Belag は切削エネルギーの移動を妨げることはなく、熱伝導体であると考えられる。

3.4 Belag 組成と工具寿命の関連性

Fig. 8, 9 は工具寿命の判定基準を V_B および K_T

Fig. 8. V-T curves of testing material cuts.

Fig. 9. V-T curves of testing material cuts.

でとったときの工具寿命曲線である。 V_B 基準の工具寿命曲線においては Belag 付着により摩耗進行がかなり不規則であり、クニックが見られる。(この原因についてはすでに報告済み⁴⁾である。)図から V_B では A-2 が良好であり、 K_T では B-1 が特に良好である。

一般に旋削における3次元切削で、しかも切削速度がかなり高い領域ではすくい面での切削温度は逃げ面の切削温度より高いといわれる⁵⁾。このことから K_T に対して有利であるということは高い切削温度に対して有利であり、逆に V_B に対して有利であるということは低い温度に対して有利であるということにほかならず、上記傾向から A₂ 系のものは低い切削温度、いいかえれば低速において、また C 系のものは高い切削温度、いいかえれば高速において有利であることがわかる。

このことと先の Fig. 2, 3 から判断して、 K_T のよくないものは Belag の付着が見られないことに起因し、 V_B のよくないものは Belag の付着はみられ

るが、介在物組成において SiO_2 , MnO が少なく、 CaO , Al_2O_3 が多いことに起因していると考えられる。Fig. 10 は切削速度を変化したときの Belag 組成と鋼中の介在物組成を A-1, A-2 材について示したものである。この状態図は $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3$ 系であるが、 MnO は CaO と置換し得るものとして処理した。図において切削速度の上昇に伴い、 Al_2O_3 は増加、 SiO_2 は減少の方向に移動すると共に、融点は高くなってくる。低速では CaO に代わり MnO がかなり入っているが、 MnO が入ると融点はより低くなるので、速度変化による Belag 組成の融点の差は図におけるよりも大きい。

つぎに鋼中に存在する介在物組成と切削により生成した Belag 組成の関係について述べてみる。

Belag 組成は上述したように切削速度が速くなるとともに高融点の組成へと変化して行く。すなわち鋼中の介在物組成は一定でなく、広範囲にわたっており、切削速度(温度)に応じて介在物は選択され Belag になるものと考えられる。また鋼中の介在物

Fig. 10. Phase diagram for the system $\text{CaO-MnO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ of belag at various cutting speed and the oxide inclusion in the material cuts A-1, A-2.

の平均組成はその組成の Belag が最もできやすいと考えられ、Fig. 10 などよりその鋼の最適切削速度が決まってくる。すなわち介在物の平均組成において、 Al_2O_3 , CaO を多くすることは高速切削向に、 MnO , SiO_2 を多くすれば低速切削向の鋼となると判断される。

3. 5 Belag 組成と切削機構

切削機構面からみた場合 Belag はどのような役割をするかについてあきらかにした報告はない。しかし工具寿命が Belag 量、組成等によりあきらかに影響をうけているのだから、当然機構面においても何らかの影響を及ぼすと考えられる。従来の研究報告⁹⁾からわかっていることは切削せん断面での応力、ひずみ状態は普通の鋼とまったくかわらず、工具すくい面での応力、ひずみ状態が若干異なることを確認しているが、前者の結果は Ca 系酸化物介在物そのものの応力集中効果はないことを意味しており、後者の結果は Belag の潤滑作用が想像できる。本実験においても従来の結果とほぼ同様な結果を得たが、特に工具すくい面の摩擦応力 τ_c と Belag 組成の関係について Fig. 11 に示す。切削速度 100m/min ではほぼ Belag 組成が $(\text{SiO}_2 + \text{MnO})/(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO})$ 変化しても τ_c はほとんど変化しないが、切削速度 200 m/min では組成比が 0.4 付近では、切削速度 100

Fig. 11. Relation between ratio of the composition of belag which is developed on the cemented carbide cutting tool and shear stress in the interface of the tool.

m/min に比べ τ_c はやや小さくなる程度であるが、組成比が大きくなるとその差は大きくなる。

組成比 $(\text{SiO}_2 + \text{MnO})/(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO})$ が大きくなるとその組成の Belag の融点は低くなる。切削速度 100m/min における切削温度では組成比の大きな Belag でも軟化することなく、組成比の小さいものと同じ状態を保っている。

しかし切削速度 200m/min では切削温度が高いが組成比の小さい Belag は切削速度 100m/min に比べ、やや軟化し τ_c を下げる程度であるが、組成比の大きな Belag ではかなり軟化し、潤滑作用をもち τ_c を低くしたものと考えられる。なお、 τ_c が切削速度 150m/min で著しく低いことは Fig. 8 の工具寿命曲線の切削速度 150m/min におけるクニック現象と関連しているものと考えられる。

3. 6 Belag の耐摩耗性

A₂ 系および C 系介在物を含む鋼（ここでは A-1 および B-1 を超硬工具 P10 であらかじめ一定量切削し、Belag を付着させた後比較材 C-1 を切削し、Belag が消滅し、K_Tが発生するまでの切削時間を便宜上 Belag の耐摩時間とした。Fig. 12 は A-1 について、Fig. 13 は B-1 についての切削時間に対する工具すくい面の摩耗状況を示したものである。まず Fig. 12 において各切削速度とも切削開始数十秒間はかなり Belag 量は不規則に変動する。このことは Belag がかなり流動性をもち、刃先に付着したものが時間の経過に伴って後方に押しやられるためと考えられる。Belag の耐摩時間は切削速度が低いほど長い。次に Fig. 13 の B-1 については切削開始と同時に Belag は急激に消滅し、切削速度 100m/min においてもさきの A-1 より著しく短い。

Fig. 12, 13 とともに Belag の耐摩効果は比較的小さく、連続的な Belag の供給源がなければ Belag の効果は十分発揮されず、Belag それ自体の耐摩性はあまり大きくない。

Table 5 は先の Belag の耐摩時間に及ぼす生成速度、試験速度および介在物の形態の効果を調べたものである。表から試験速度の影響がもっとも大きく、低速側ほど Belag の耐摩時間は長くて良好であることがわかる。

Fig. 12. Wear resistance of belag developed on the cemented carbide cutting tool.

Fig. 13. Wear resistance of belag developed on the cemented carbide cutting tool.

介在物形態では A₂ 系の方が C 系より耐摩時間は長い。試験速度とは若干交互作用が認められる。すなわち低速域で A₂ 系の方が C 系より効果が大きい。

この種の傾向は試験速度と生成速度の関係においてもみられる。Fig. 14 は Belag 生成温度と耐摩時間の関係を示したもので、A₂ 系、C 系とも最適生成切削温度は 800~850°C である。

Table 5. Wear resistance of belag developed from material A-1 (A₂ type) and the B-1 (C type)

Cutting speed tested (m/min)	Type of inclusion					
	A ₂ (A-1)			C (B-1)		
	Cutting speed for development of belag (m/min)					
	100	150	200	100	150	200
100	0.5	22	18	3	7.3	3
150	3	1.3	0.8	0.5	0.3	0.5
200	0.3	0.3	0.5	0.5	0	0

Fig. 14. Relation between temperature for developing belag and wear resistance of belag on the cutting tool.

4. 結 論

Belag が超硬工具 P10 の工具摩耗に及ぼす影響を調べるため、Belag の生成挙動を中心に研究した結果次の知見を得た。

1) Belag 組成は鋼中介在物の組成に左右され、同一切削条件でも鋼中介在物が異なる場合 Belag 組成は一致しない。また一般に切削速度の増加に伴ない Belag 組成中の SiO_2 , MnO は減少し、 Al_2O_3 , CaO は増加する。

2) 鋼中含 Ca 酸化物系介在物が C 系介在物の場合は K_T が発生する限界切削速度が大きく、 A_2 系介在物では限界切削速度が小さい。

3) Belag は熱伝導体であり、Belag としての効果がなくなる限界切削温度は介在物形態により大きく右

左されるが、 Ca 量そのものも影響する。

4) Belag は工具の拡散に起因する K_t 摩耗の barrier として働く固体物質層であると同時に工具すくい面の工具と切くずの摩擦応力を減ずる粘性被膜として潤滑作用を有する。

5) Belag の耐摩耗性は $\text{CaO}-\text{MnO}-\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3$ の連続的な供給源 (介在物として) がなければ十分な効果が発揮されず、Belag それ自体の耐摩耗性はあまりない。さらに切削速度が低い方が耐摩時間は長く、介在物では A_2 系の方が C 系より良好で、 A_2 系、C 系とも最適生成温度は $800\sim 850^\circ\text{C}$ である。

終りに本研究を行なうにあたり、終始ご指導およびご協力を賜った大同製鋼株式会社研究開発本部中央研究所第 5 研究室長阿部山尚三氏および関係諸氏に深く感謝致します。

(文 献)

- 1) K. J. Trigger; Trans. ASME., 80 (1958), 302
- 2) M. C. Show, E. G. Loewen; Trans. ASME., 76 (1954), 217
- 3) H. Opitz, M. Gappisch, et al.; Arch. Eisenhüttenw., 33 (1962), 841
- 4) 伊藤哲朗, 木村篤良; 昭和 44 年度精機学会秋季大会講演前刷, (1969), 241
- 5) K. J. Trigger, B. T. Chao; Trans. ASME, 73 (1951), 57
- 6) 伊藤哲朗, 木村篤良; 昭和 44 年度精機学会秋季大会講演前刷, (1969), 235