

論 文

高速度鋼工具による切削時の含硫黄快削鋼の 被削性に及ぼす脱酸法の影響*

藤田 達**・山口喜弘**・萩原康禎**・金田次雄***・柳 義親***

Effects of Deoxidation on the Machinability of Resulphurized Steels in Machining with High Speed Steel Tool

Tatsu FUJITA, Yoshihiro YAMAGUCHI, Yasuyoshi HAGIHARA

Tsugio KANEDA, and Yoshichika YANAGI

Synopsis:

Effects of deoxidation and chemical composition on the machinability based on tool life in machining low carbon resulphurized steels and medium carbon steels with high speed steel tool are investigated.

In turning low carbon resulphurized steels, core of rimmed steel has superior tool life characteristics, while rimmed layer has poor one due to its cleanliness. Mn-S killed steels with very low Si content, which are killed due to high Mn and high S contents, have good machinability uniformly from outer layer to core. Si deoxidation is very detrimental to the machinability. High oxygen content is favorable to the formation of round sulphides in Mn-S killed steels, and their machinability are improved with increasing ΣO content up to 0.026%. Sulphide shape substantially affects chip formation behavior and cutting temperature. The poor machinability of Si deoxidized resulphurized steels is due to formation of elongated sulphides and hard oxide particles. Tool life is well correlated to the cutting temperature and amount of hard particles such as SiO_2 and Al_2O_3 in steels.

In machining medium carbon steels with different S contents, deoxidation seems to have minor effects on their machinability.

Concerning with dependence of machinability on sulphide shape, the effects of cutting direction on the machinability of resulphurized steels are also discussed.

(Received Mar. 18, 1971)

1. 緒 言

鉄鋼の被削性に及ぼす脱酸法の影響に関しては古くから多くの研究がなされているが、今日でも重要な究明すべき問題として存在している。脱酸法による鉄鋼の被削性の変化は鋼中の酸化物や硫化物の性状、分布の変化、用いた脱酸合金の基質に及ぼす2次的効果などに関連すると考えられ、また脱酸の影響は切削方法、特に工具材質により大きく異なってくる。

超硬工具による切削時の被削性に及ぼす脱酸法の影響に関してはいわゆるCa脱酸快削鋼に関連してわが国でも多くの研究がなされているが、本報は主として低炭素系硫黄快削鋼と含硫黄中炭素鋼を対象とし、高速度鋼工具を用いて切削する場合の被削性、特に工具寿命特性に及ぼす脱酸法の影響について著者らが従来から行なつ

てきた実験結果をまとめ、検討を加えたものである。

2. 実験方法

2.1 供試材料

本研究でとりあげている供試鋼は3グループに大別される。グループⅠは広範囲の含S快削鋼、グループⅡは低C・低Si・高S快削鋼、グループⅢはS量、脱酸法の異なる中炭素鋼からなっている。グループⅡはさらに3つのサブグループに分けられる。グループⅡ-A、Ⅱ-Bはほとんど同時期に溶製された鋼であるが、前者の供試鋼中の ΣO 量は実験の過程で欠測値となつている。

* 昭和45年10月本会講演大会にて発表
昭和46年3月18日受付

** (株)神戸製鋼所中央研究所

*** (株)神戸製鋼所鉄鋼事業部

Table 1. Chemical composition of steels tested (Group I).

No	Composition (%)									Remarks
	C	Si	Mn	P	S	Al	Σ N	Σ O	Pb	
I-1	0.10	0.26	0.56	0.016	0.024	0.034	0.002	0.005	tr.	Plain C-steel, S10C
I-2-a	0.06	0.01	0.48	0.022	0.044	0.005	0.002	0.012	〃	Rimmed, skin
I-2-b	0.12	0.01	0.49	0.048	0.148	0.003	0.002	0.012	〃	Rimmed, core
I-3	0.18	0.22	1.17	0.021	0.116	0.001	0.007	0.005	〃	Si killed
I-4	0.11	0.19	0.73	0.076	0.182	0.003	0.006	0.018	〃	Si killed
I-5-a	0.08	0.02	0.88	0.092	0.213	0.006	0.002	0.018	〃	Mn-S killed, skin
I-5-b	0.08	0.02	0.87	0.06	0.199	0.007	0.002	0.016	〃	Mn-S killed, core
I-6	0.07	0.02	0.76	0.066	0.283	0.006	0.011	—	0.23	—
I-7	0.07	0.02	0.76	0.066	0.283	0.006	0.011	—	tr.	—
I-8	0.15	0.27	0.82	0.078	0.236	0.008	0.006	—	0.19	—
I-9	0.15	0.24	0.82	0.078	0.236	0.006	0.006	—	tr.	—

Table 2. Chemical composition of steels tested (Group II).

Sub-Group	No	Composition (%)									Remarks
		C	Si	Mn	P	S	Al	Σ N	Σ O	Pb	
II-A	II-A-1	0.08	0.003	0.76	0.104	0.344	tr.	0.0025	—	tr.	—
	-2	0.07	0.008	0.86	0.104	0.279	〃	0.0055	—	〃	—
	-3	0.08	0.013	0.79	0.129	0.399	0.002	0.0030	—	〃	—
	-4	0.11	0.028	1.11	0.078	0.289	tr.	0.0054	—	〃	—
	-5	0.12	0.042	1.12	0.102	0.330	〃	0.0047	—	〃	—
	-6	0.10	0.025	0.91	0.094	0.347	〃	0.0050	—	〃	—
	-7	0.06	0.002	0.96	0.085	0.312	0.006	0.0100	—	〃	—
	-8	0.05	0.002	0.88	0.073	0.226	tr.	0.0083	—	0.14	—
II-B	II-B-1	0.08	0.010	0.96	0.092	0.281	0.001	0.0089	0.0210	tr.	—
	-2	0.09	0.011	0.94	0.103	0.320	0.002	0.0100	0.0110	〃	—
	-3	0.06	0.010	0.94	0.088	0.272	0.002	0.0083	0.0340	〃	—
	-4	0.09	0.006	0.95	0.106	0.320	0.002	0.0095	0.0120	〃	—
	-5	0.07	0.006	0.96	0.110	0.345	0.001	0.0096	0.0120	〃	—
	-6	0.08	0.015	0.96	0.081	0.305	0.001	0.0054	0.0210	0.18	—
	-7	0.06	0.006	0.91	0.086	0.298	0.001	0.0064	0.0170	0.31	—
	-8	0.08	0.004	0.95	0.074	0.281	0.001	0.0056	0.0170	0.15	—
	-9	0.09	0.011	1.08	0.076	0.282	0.001	0.0095	0.0094	0.25	—
	-10	0.08	0.006	0.96	0.101	0.330	0.001	0.0085	0.0112	0.26	—
II-C	II-C-1	0.11	0.011	0.84	0.096	0.299	0.001	0.0020	0.0218	tr.	—
	-2	0.12	0.017	1.08	0.088	0.292	0.001	0.0030	0.0175	〃	—
	-3	0.10	0.015	0.95	0.058	0.246	0.001	0.0020	0.0180	〃	—
	-4	0.08	0.008	0.88	0.100	0.259	0.001	0.0040	0.0242	〃	—
	-5	0.11	0.005	0.76	0.097	0.354	0.001	0.0040	0.0414	〃	—
	-6	0.06	0.005	0.66	0.086	0.242	0.001	0.0040	0.0396	〃	—
	-7	0.05	0.013	0.79	0.088	0.301	tr.	0.0080	0.0084	〃	Vacuum
	-8	0.05	0.015	0.79	0.090	0.308	tr.	0.0080	0.0106	0.19	Degassed

グループ II-C の供試鋼については硫化物形態などについての調査もなされた。グループ III は 2 つのサブグループに分けられる。II-A は FeSi+Al 脱酸および FeSi 脱酸、II-B は FeSi+CaSi 脱酸鋼である。各鋼は大形炉あるいは 3 t 高周波炉で溶製された。

Table 1~Table 3 に各グループの供試鋼の化学成分、ガス成分、脱酸法などを示す。なお、表中の Mn-S キルド鋼とは MÜLLER⁵⁾に従って、低 Si 含有鋼において高 Mn、高 S 含有のためにリミングアクションが抑制され鎮静する鋼のことを称している。

被削性評価は長手旋削時の工具寿命特性を中心に行なつた。工具材質は SKH9 (H_RC 63~65) で工具形状は (0, 15, 6, 6, 6, 0, 0.5)、使用旋盤は昌運カズヌーブ高速旋盤 HB-500 である。またグループ III の供試鋼群についてはドリルによる穴あけ試験もあわせて行なつた。使用ドリルは SKH9 製で直径 7.5 mm であり、1 回当たりの穴あけ深さは 22.5 mm とした。工具寿命判定は旋削の場合は完全切削不能を、穴あけの場合は工具摩耗および異常音発生などを基準とした。実験条件を単純化するために切削油剤は用いなかつた。

Table 3. Chemical composition of steels tested (Group II).

Sub-Group	No	Composition (%)						Hardness Hv	Deoxidizing alloys
		C	Si	Mn	P	S	Al		
III-A	III-A-1	0.50	0.25	0.75	0.018	0.014	0.001	171	III-A-1, -3, -9: FeSi the others: FeSi+Al
	-2	0.42	0.29	0.67	0.010	0.015	0.021	167	
	-3	0.48	0.26	0.75	0.024	0.016	0.004	185	
	-4	0.48	0.28	0.73	0.018	0.016	0.033	182	
	-5	0.43	0.29	0.74	0.014	0.018	0.025	175	
	-6	0.43	0.25	0.76	0.014	0.023	0.033	165	
	-7	0.48	0.28	0.81	0.014	0.036	0.028	176	
	-8	0.45	0.25	0.83	0.019	0.040	0.026	183	
	-9	0.37	0.24	1.42	0.025	0.090	0.007	196	
	-10	0.40	0.28	0.75	0.013	0.054	0.052	169	
III-B	III-B-1	0.41	0.28	0.44	0.007	0.013	0.003	154	CaSi
	-2	0.38	0.24	0.72	0.014	0.014	0.004	172	
	-3	0.49	0.25	0.51	0.014	0.016	0.007	174	
	-4	0.49	0.25	0.81	0.011	0.020	0.010	193	
	-5	0.40	0.30	0.78	0.013	0.040	0.010	175	
	-6	0.51	0.30	0.76	0.015	0.050	0.001	188	
	-7	0.46	0.29	0.72	0.017	0.056	0.001	184	
	-8	0.38	0.30	0.76	0.012	0.058	0.008	176	
	-9	0.41	0.26	1.44	0.026	0.092	0.005	197	

3. 結果および考察

3.1 高S快削鋼の被削性と脱酸法の関係

3.1.1 リムド鋼, Mn-S キルド鋼, Si キルド鋼

Sを多く含む快削鋼を高速度鋼工具で切削する場合の被削性が脱酸法の影響を強く受けることは古くから知られており, 脱酸による鋼中に残留する酸化物, および硫化物の性状の変化との対応として論じられている.

グループIの供試鋼群を例にとつて検討してみると, SKH9 工具で送り 0.32 mm/rev., 切込み 2.0 mmで旋削した場合の V_{30} 値 (30 min 工具寿命を与える切削速度) に及ぼす化学成分の影響を多重回帰分析した結果は (1)式で与えられる.

$$V_{30}(m/min) = 80.0 - 115.0Si(\%) + 62.7S(\%) - 2672.3\Sigma N(\%) \dots\dots\dots(1)$$

この場合, 各成分の寄与を直線的とみなし, 交互作用を無視しているが, 重相関係数は 0.78 で有意である. 他の成分の効果はサンプル数が比較的少なかったため, 有意とは認められていない. (1)式はSの正の効果, Siおよび ΣN の負の効果を示しており, 被削性に関してはSiは有害であることが認められる.

グループIの各供試鋼のなかでI-2 はリムド鋼, I-4 はSi キルド鋼, I-5 はMnS キルド鋼であり, I-2 a I-5 a は表層部, I-2 b, I-5 b は中心部である. 表層部および中心部は供試鋼の横断面のサルファ・プリントおよびマクロ組織により判別し, 試験を行なつたが, I-2 a は明らかにリム層に対応することが認められた. I

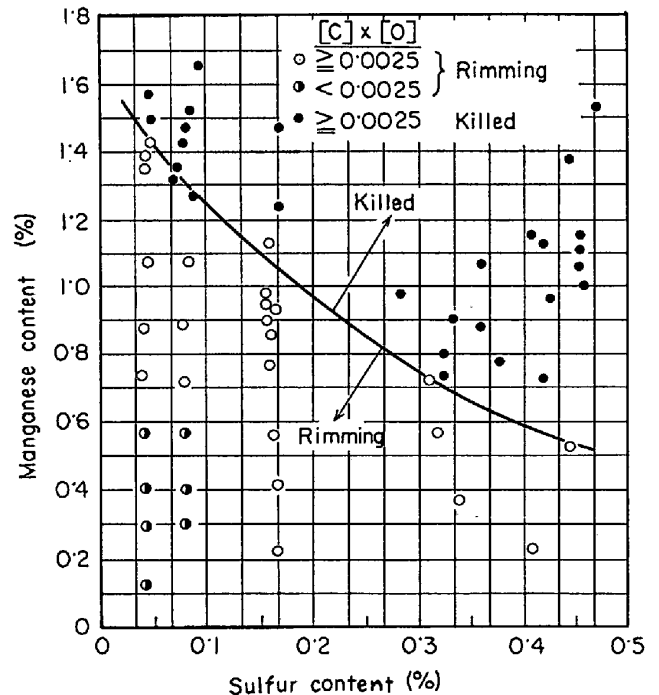


Fig. 1. Rimming action as a function of Mn and S contents (0.04~0.13 C Steels)⁵⁾.

-5 鋼は低 Si, 高 ΣO 水準にあるが, 高 Mn, 高 S 含有のため, リミングアクションは抑制されている. Fig. 1 に示す MÜLLER ら⁵⁾によるリミングアクション抑制のための Mn, S 量の成分領域の近くに I-5 鋼は位置している. 低 C・低 Si の含 S 快削鋼では Fig. 1 の境界層の下方はリムド鋼, 上方は Mn-S キルド鋼となる. したがつて I-2 a, I-2 b, I-4, I-5 a, I-5 b 鋼の

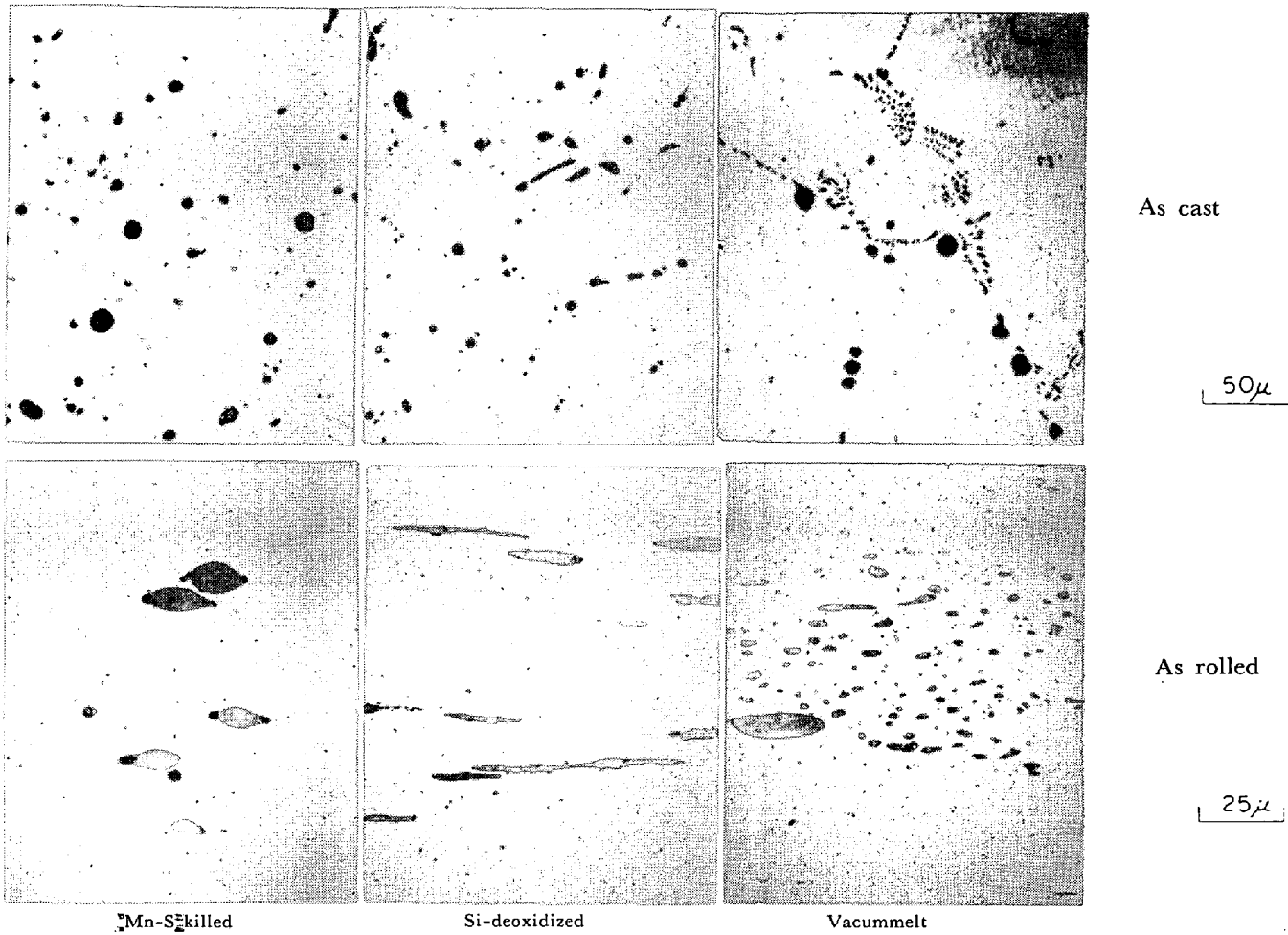


Photo. 1. Dependence of sulphide shape on the deoxidation in as-rolled and as-rolled conditions.

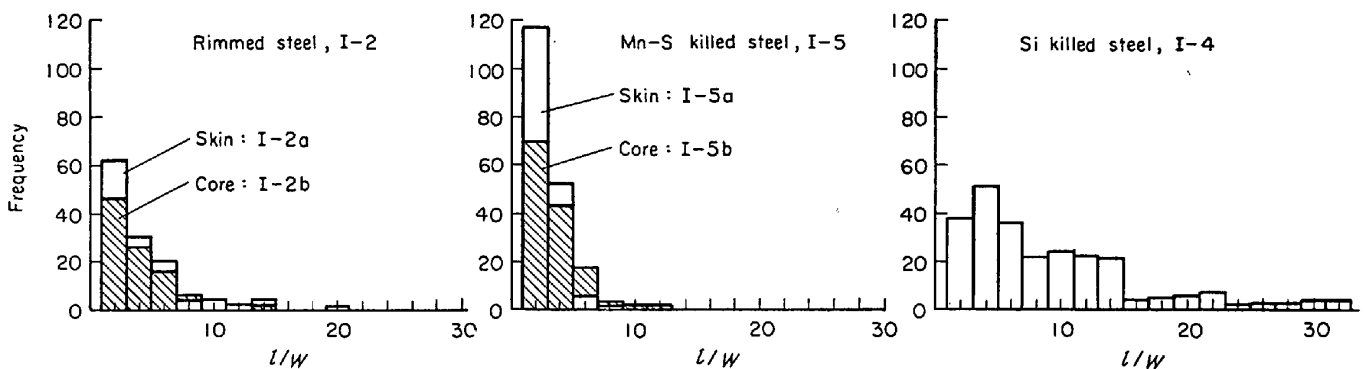


Fig. 2. Distributions of length vs. width ratio of sulphide in various resulfurized low carbon steels.

被削性を比較するのは興味深い。

Photo. 1 は各種鋼の鑄造状態および熱間加工後における硫化物の形態を示す。ΣO水準の高いリムド鋼あるいは Mn-S キルド鋼では凝固は Miscibility Gap において進むので硫化物はアト・ランダムに大きく晶出し⁵⁾, その硫化物は熱間加工に際しても変形しにくい。Si キルド鋼においては脱酸の程度によつて凝固時の硫化物の分布は変動するが, Mn-S キルド鋼より微細に分布する傾

向にあり, 熱間加工に際して硫化物は非常に延伸されやすくなる。真空溶解したり, あるいは Al など強い脱酸を行なつた鋼では共晶的に硫化物は微細に粒界に沿つて生成する傾向にある。第 1 の場合を SIMS に従つて I 形の硫化物, 第 3 の場合を II 形の硫化物とも称している⁶⁾。硫化物が I 形から II 形に移る臨界酸素量は 0.008 ~ 0.010% 程度であるといわれている⁵⁾。

Fig. 2 に I-2a, I-2b, I-4, I-5a, I-5b 鋼中の

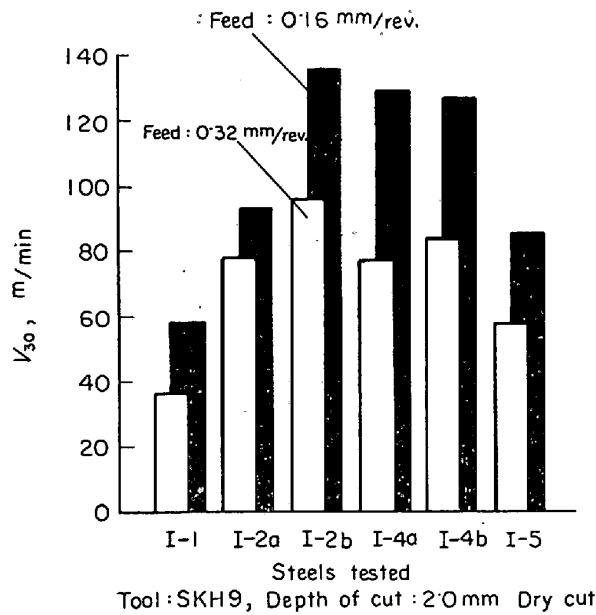


Fig. 3. V_{30} -values of various type of resulfurized low C steels.
Tool:SKH9, Depth of cut:2.0mm Dry cut

硫化物の形状 (長さ/幅比) の分布を示す。低 Si の I-2, I-5 に比し, Si キルド鋼 I-4 の硫化物は非常に細長く, かつ, 微細に分布していることが明らかであり, 従来の報告とも一致している。

Fig. 3 は以上の各鋼および比較のための低 S の I-1 鋼 (S10C) を SKH9 工具で送り 0.16 mm/rev. および 0.32 mm/rev. 切込み 2.0 mm で旋削した場合の V_{30} 値を示す。I-1 鋼に比し, I-2, I-4, I-5 の各含 S 快削鋼の工具寿命特性は非常にすぐれていることは明らかであるが, その中で, リムド鋼の中心部の被削性が最もすぐれていることが認められる。リムド鋼のリム層は S 量もかなり低く被削性の低いのは当然であろう。Mn-S キルド鋼 I-5 の表層部・中心部は被削性にほとんど差異はなく, リムド鋼中心部と同等の被削性を有する。いつぼう Si キルド鋼 I-4 は他の化学成分の変動の影響を (1) 式などで補正して考えてもかなり被削性は劣っており, Si キルドが有害であることが明りように認識される。

3.1.2 低C・低Si・高S快削鋼における酸素量と被削性

前項からも明らかなように, 高 S 快削鋼の被削性改善のためには低 Si であることが要求されるが, 低 C・低 Si・高 S 快削鋼の被削性に及ぼす諸因子の影響をさらに明確にするために, グループ II-A, II-B, II-C の供試鋼群について詳細な検討を行なった。この群の各鋼は脱ガス処理を行なった II-C-7, II-C-8 鋼を除いてすべて Mn-S キルド鋼と考えられる。また, 鋼中の硫化物

は I 形とみなされる。

同一時期に溶製されたグループ II-A, II-B について SKH-9 工具を用いて, 送り 0.16 mm/rev. で旋削した場合の V_{30} 値に及ぼす ΣO 量を除く化学成分の影響を重回帰分析した結果を (2) 式に示す。重相関係数は 0.66 であり, Si(%), $\Sigma N(\%)^2$ の係数は 5%, 1% の危険率でそれぞれ有意である。

$$V_{30}(\text{m/min}) = 122.1 - 531.7\text{Si}(\%) - 256.762 \cdot 0 \Sigma N(\%)^2 \dots\dots\dots (2)$$

先の (1) 式と同様に, Si, ΣN の負の効果が認められる。

いつぼう, 鋼中の ΣO 量の影響もあわせて把握するためにグループ II-B, II-C の供試鋼群について検討を行なった。その際, グループ II-B と II-C の工具寿命特性を調査する場合に, 切削試験の場に経時的な変動がないことは標準材による試験により確認を行なった。(3) 式に重回帰分析の結果を示す。

$$V_{30}(\text{m/min}) = -36.7 + 211.1\text{S}(\%) + 52.4\text{Pb}(\%) + 6.469 \Sigma O(\%) - 121.579 \Sigma O(\%)^2 \dots\dots\dots (3)$$

重相関係数は 0.78 で有意であり, S(%), Pb(%) の係数は 5%, $\Sigma O(\%)$, $\Sigma O(\%)^2$ の係数は 1% の危険率でそれぞれ有意であり, ΣO 量の寄与が大きい。(2) 式と異なり, (3) 式において ΣN の効果が有意と認められなかったのは解析の対象となつた供試鋼群において, たまたま ΣO 量と ΣN 量に弱い負の相関があり, ΣO 量の効果に打ち消されたのではないかと考えられる。また Si 量の寄与については次のように考えられる。Fig. 4 はグループ II-A および II-B の V_{30} 値

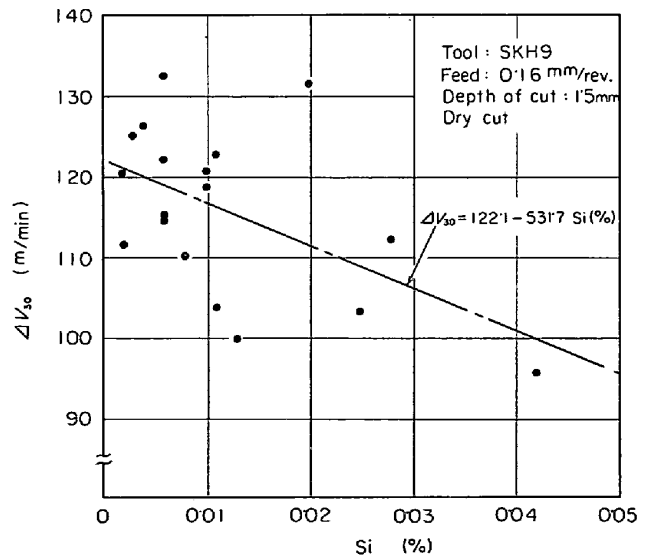


Fig. 4. The variation of tool life characteristics with Si content for resulfurized low carbon steel (Group II-A and II-B).

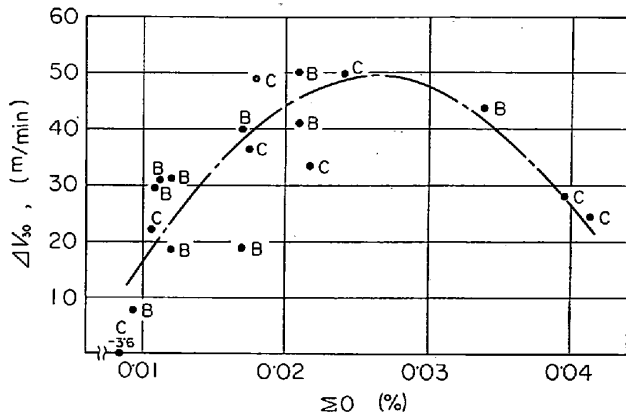


Fig. 5. The variation of tool life characteristics with total oxygen content for resulphurized low carbon steels containing very small amount of Si (Group II-B and II-C).

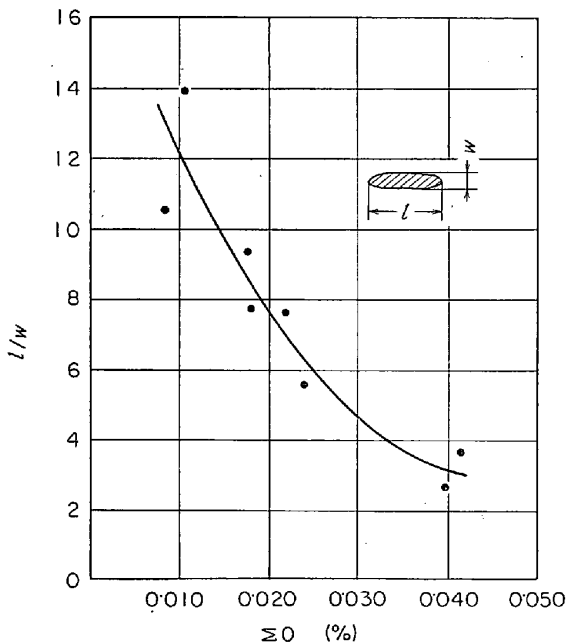


Fig. 6. Dependence of sulphide shape on the total oxygen content in resulphurized low carbon steels (Group II-C).

を(2)式に基づいて ΣN 量で補正した ΔV_{30} 値 (すなわち $V_{30} + 256762 \cdot 0 \Sigma N(\%)^2$) を Si 量に対してプロットした図であるが、高 Si 側で明りような工具寿命特性の低下が認められる。しかし、Si が 0.01% 以下では Si 量の変化にともなう ΔV_{30} 値の対応はそれほど明りような傾向を示していない。いつぼう、グループ II-B、II-C の供試鋼群を考えた場合、Si 量は 0.01% 以下あるいはその近傍に集中しており、そのため、重回帰分析に際して Si の効果が有意とならなかったであろう。

Fig. 5 はグループ II-B、II-C の供試鋼群の V_{30} 値を(3)式によつて S、Pb 量を補正した ΔV_{30} 値 (すな

わち、 $V_{30} - 211 \cdot 1S - 52 \cdot 4Pb$) を ΣO 量に対してプロットした図である。工具寿命特性は ΣO 量の 2 次関数となり、(3)式によれば ΔV_{30} 値の極大値は ΣO 量が 0.026% の場合に与えられることになる。ただし、定量的な検討にはより ΣO 高水準の供試鋼のサンプル数を多くする必要があろう。

以上の結果に対応してグループ II-C の供試鋼群について鋼中の ΣO 量と硫化物の形状 (長さ/幅比) の関係を求めたのが Fig. 6 である。低 C・低 Si の含 S 快削鋼においては硫化物の長さ/幅比は ΣO 量と明りような負の相関があり、高 ΣO 水準の鋼では熱間加工時に硫化物に変形しにくいことがわかる。 ΣO 量が増すとともに硫化物の長さ/幅比は単調に減少するが、工具寿命特性は極大値を示した後に低下する傾向がある点に留意する必要があると考えられる。

なお、一般に吹止め時の C 量が低いほど ΣO 量は高くなる傾向にあるのが、本研究で用いたグループ II-B、II-C の供試鋼群については両者の間の相関は統計的には有意ではない。これは C 量の変動範囲がせまいこと、脱ガス材が含まれていることなどによると考えられる。

3.1.3 脱酸法と被削性の関係

低 C・高 S 快削鋼の被削性に及ぼす脱酸法の影響は硫化物形態との対応で論じられることが多い^{(9)~(12)}。硫化物の形態に及ぼす諸因子の影響についてはすでに多くの議論があるが^{(5)~(8)~(13)~(15)}、熱間加工条件が同様であれば一般に SiO_2 系酸化物が少なく、酸可溶性酸素量 (SiO_2 や Al_2O_3 のような安定した酸化物を形成していない酸素量) が大きいほど硫化物は延伸されにくくなる。

Fig. 7 は ΣO 量に対して、温硝酸法で抽出された

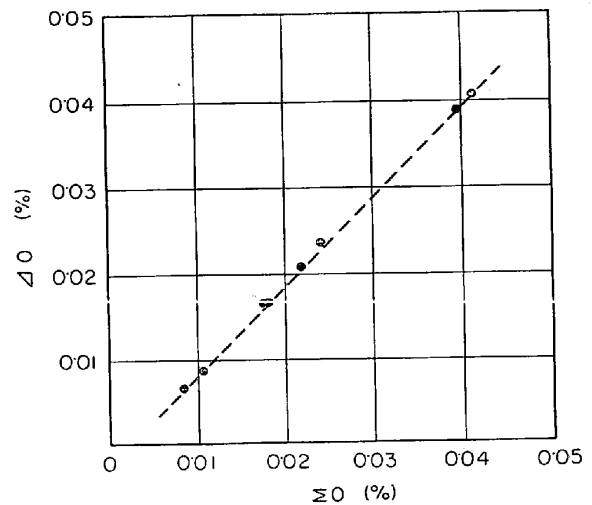
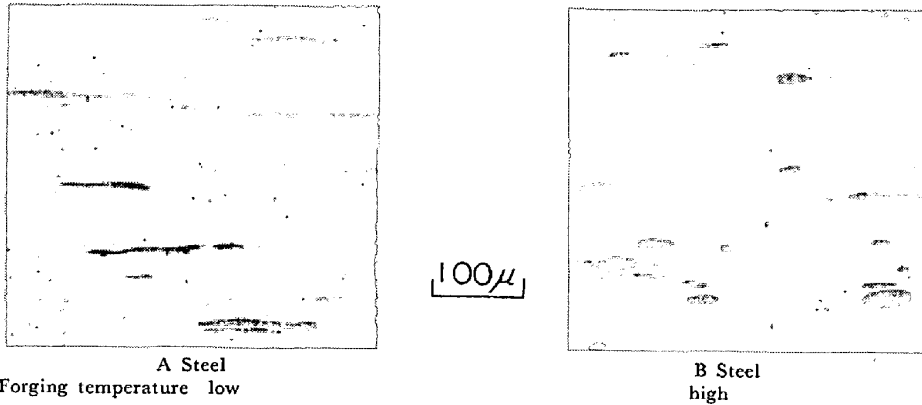


Fig. 7. Relationship between total oxygen content and soluble oxygen content in Group II-C steels.

Chemical composition of steel tested

C : 0.06 Si 0.003 Mn : 1.06 P : 0.076 S : 0.354



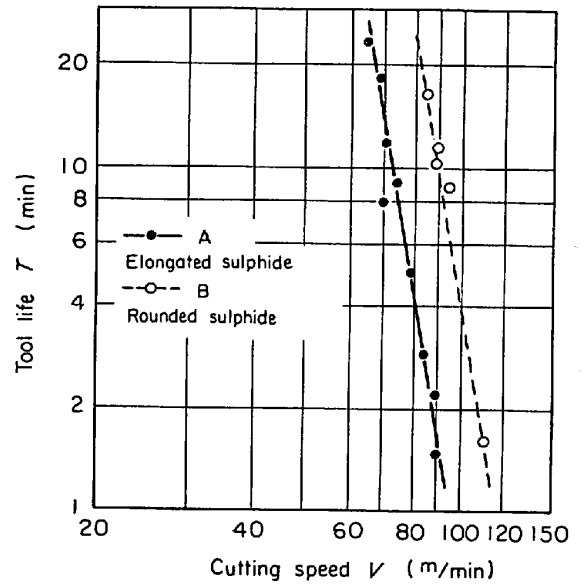
A Steel
Forging temperature low

B Steel
high

Photo. 2. Variation of sulphide shape with forging temperature.
Both steels tested are sampled from the same billets.

SiO₂, Al₂O₃ に対応するO量を ΣO 量より差引いた酸可溶性酸素量 4O の関係を示している。残査分析の結果を検討するとこのような高 ΣO 水準で他に強い脱酸剤を用いない場合には、微量の Si はほとんど SiO₂ として存在するようであり、いつぼう、Si 量が非常に微量であるので ΣO 量と 4O 量はよい対応を示している。Fig. 6 と Fig. 7 を合せて考えると、ここで検討している供試鋼群の範囲では熱間加工後の硫化物形態は酸可溶性酸素量 4O の影響をより強く受けているといえる。

いつぼう、同一インゴットでも熱間加工条件が変化すると硫化物形態も変化する¹²⁾¹⁶⁾。Photo. 2 は同一ビレットの相隣る部分よりサンプリングし、熱間加工温度を変えて同一加工度で鍛造した高 S 快削鋼の硫化物形態を示す。それらの供試鋼を焼ならし後旋削した場合の V-T 線図を Fig. 8 に、また切削抵抗測定結果を Fig. 9 に示す¹⁷⁾。なお、切削抵抗は硫化物の延伸方向に対して平行、および直角方向に 2 次元的に切削した場合の値であり f_p は主分力、 f_q は送り分力である。これらの結果より明らかのように、化学成分、鋼中の酸化物などの介在物組成が全く同様と考えられる状態で硫化物形態のみを変化させた場合にも、硫化物形態は被削性に重大な影響を与え、長さ/幅比の小さい硫化物を有する鋼は長さ/幅比の大きい硫化物を有する鋼に比し、切削抵抗、したがって単位体積の切くずを生成するに要する仕事量が小さく、工具寿命特性がすぐれていることが認められる。そして硫化物形態そのものが含 S 快削鋼の切削機構的挙動に変化をもたらし、その結果、工具寿命特性に影響を与えていると考えられる。そのことは切削方向が硫化物延伸方向と平行、および直角方向の場合に切くず生成挙動が大きく変化することからも確認できる。以上のことから、含 S 快削鋼を切削する際の切くず生成挙動に



Cutting condition : same as Fig. 4

Fig. 8. Effect of sulphide shape on the tool life characteristics of resulphurized steels from the same billets.

及ぼす硫化物の効果は 2 次元切削においては工具-切くず接触面へ切削方向から投影された硫化物の面積の増加関数とみなしうようである。

このように、硫化物の組成、その弾塑性、基質との界面の状態が同様であるとすれば、硫化物形態が切くず生成挙動に重大な影響を有し、長さ/幅比の小さい硫化物を有する鋼が好ましいことは明らかである。しかし、先の Fig. 5 および Fig. 6 におけるように ΣO 量が高くなると硫化物の長さ/幅比が小さくてもかえって被削性が低下する原因は次の 2 点のいずれかであろう。第 1 は高 ΣO 水準になり、硫化物中の MnO の固溶量などの変化によつて硫化物の性質が切くず生成挙動に悪影響

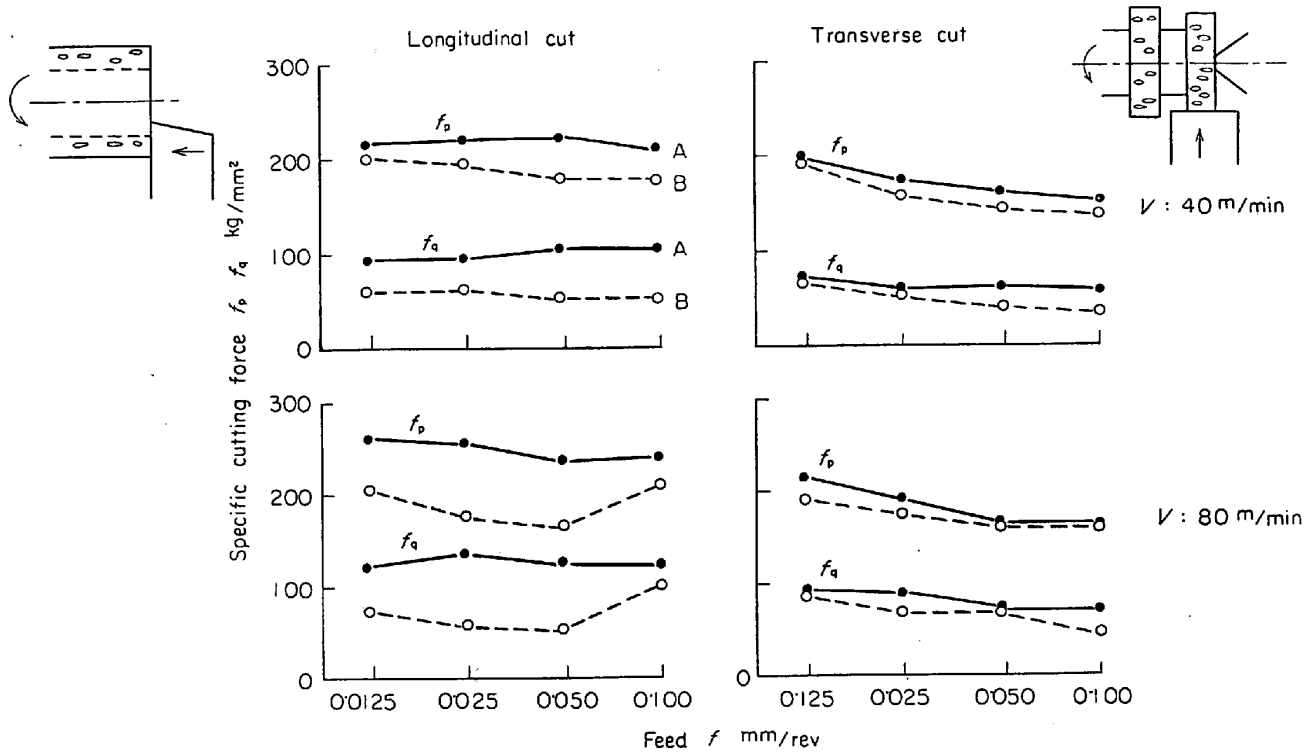


Fig. 9. Dependence of cutting force on sulphide shape and cutting direction in quasi-orthogonal cutting resulphurized steel.

を及ぼすようになる可能性, 第2は MnO や FeO のような酸化物も多量になれば機械的摩耗を促す効果を有する可能性である. これらの点についてはさらに検討を進める必要がある.

ちなみに, この分野の従来の多くの研究は簡易試験による被削性評価を基準にしているものが多く, 問題がある. VAN VLACK は B 1112, B 1113 快削鋼について, 工具形状, 切削速度, 切込みおよび送り 圧力を一定にして長手旋削を行ない, 送り速度の大きさの大小で被削性を評価することによつて 0.05% までの範囲において Si 量と被削性, 硫化物の長さ/幅比と被削性の間に負の相関があることを見出している⁹⁾が, このような被削性評価は切削抵抗の送り分力の測定と対応したものと考えられる. また, PALIWADA は軟質工具を用い, 切削速度を漸増させ, 工具摩耗を加速する方法で被削性を評価することによつて, C 1 213 快削鋼などの被削性及び化学成分などの影響を調査し, VAN VLACK と同様の結論を得ている⁹⁾¹⁰⁾. このような短時間切削試験による被削性調査では, 硫化物性状や基質の影響については通常の切削時と対応した結果を得られる可能性があるが, 鋼中の硬質の酸化物などによるアブレッシブな作用を過小評価する傾向があり, 定量的な議論には不相当であると考えられる.

いつぼう MÜLLER らの詳細な工具摩耗を基準にした調査¹⁰⁾では, Si や Al を含む脱酸剤で脱酸した硫黄快削鋼では, 鋼中の酸化物量と工具摩耗特性との間には強い相関があり, また Mn-S キルド鋼においては ΔO 量が増大するとともに工具寿命特性は改善され, 0.030% 程度に最適値があり, また硫化物形態と被削性の間には明りような対応がないとの結論を得ている点には留意すべきであろう.

以上は低 Si・高 ΔO 水準の含 S 快削鋼についての議論であるが, グループ I の供試鋼群で検討したような多量の FeSi 合金などで脱酸した鋼では酸化物の影響がより大きくあらわれるようである. 含 S 快削鋼に 0.20% 程度の Si が含まれる場合, ΔO 量が低下することによる硫化物性状の変化, SiO₂ など硬質の安定した酸化物量の増大, Si の固溶体強化による基質の変形抵抗の上昇, 高速度鋼工具で切削する場合の工具-被削材間の熱起電力の Si 含有による上昇などの効果を総合して検討する必要がある.

Fig. 10 は 0.10%C, 0.20%S を含み, さらに Pb, Bi, Te, Se, P, N などをも 2 次的に単独あるいは複合して添加した小形溶製の Mn-S キルドおよび Si キルド, Al キルド快削鋼を高速度工具で切削した場合の工具寿命に及ぼす切削温度 T(°K) と鋼中の SiO₂+Al₂O₃ 量

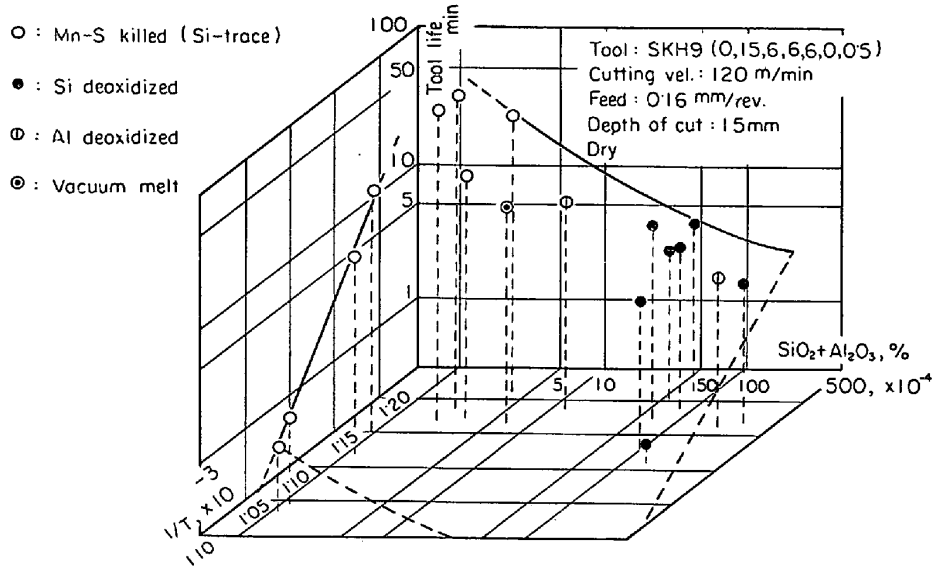


Fig. 10. Dependence of tool life on cutting temperature and amount of hard oxides in turning free machining steels¹⁹⁾.

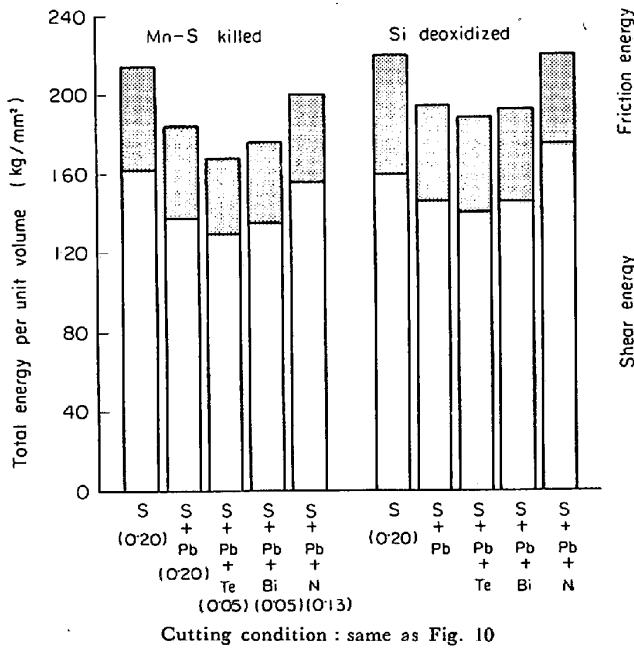


Fig. 11. Comparison of specific cutting energy in cutting various kinds of free machining steels.

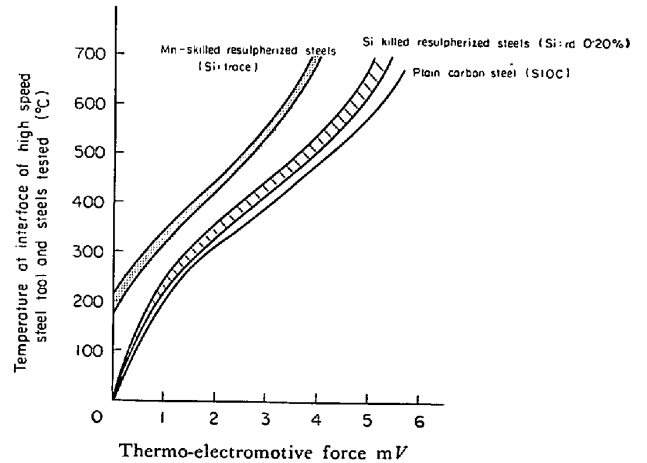


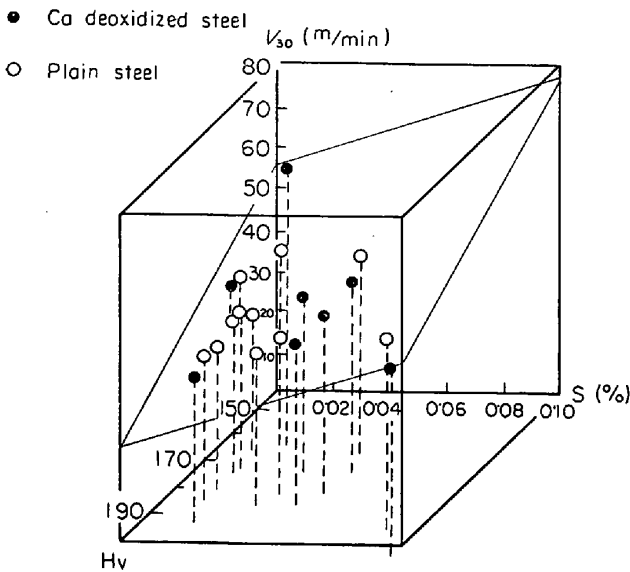
Fig. 12. Dependence of thermo-electromotive force on temperature at interface of high speed steel SKH9 tool and various low C steels.

の影響を示している¹⁹⁾。図より、 $SiO_2+Al_2O_3$ のような硬質の酸化物が高速度鋼工具の機械的摩耗を促していること、酸化物量がほとんど同じ快削鋼では工具摩耗は同じ熱活性過程に支配されていることが推測される。この場合、Pb, Bi, Te は切削温度を低下させ、多量のNは上昇させることが認められている。Fig. 11 は Fig. 10 に対応して各種快削鋼を同じ切削条件で単位体積切削するに要する仕事量を切削抵抗、切削比測定結果より求めたものである。図より明らかなように全体に Si キルド

鋼 (Si:0.20%) に比し、Mn-S キルド鋼切削時の仕事量が少し低下していること、および Pb, Te, Bi, N の影響が前述の切削温度と傾向を同じくしていることが認められる。Fig. 11 に示される切削仕事量に及ぼす脱酸法の影響には硫化物形態の変化と Si による基質強化の効果が含まれていると考えられる。なお、Si 含有によって同一温度における高速度鋼工具と被削材間の工具を正極とする熱起電力は Fig. 12 のように上昇することが認められるが、その電気化学的摩耗促進効果については確証を得ていない。

3.2 中炭素鋼の被削性と脱酸法の関係

低C・高S快削鋼では脱酸はアブレッシブな作用をする酸化物を鋼中に残留させること、硫化物性状に変化を



Tool: SKH9, Feed: 0.25mm/rev., Depth of cut: 1.5mm, Dry cut.
 Fig. 13. Relation between S content and Vickers hardness number of medium C steel, and V_{30} in turning with SKH9 tool.

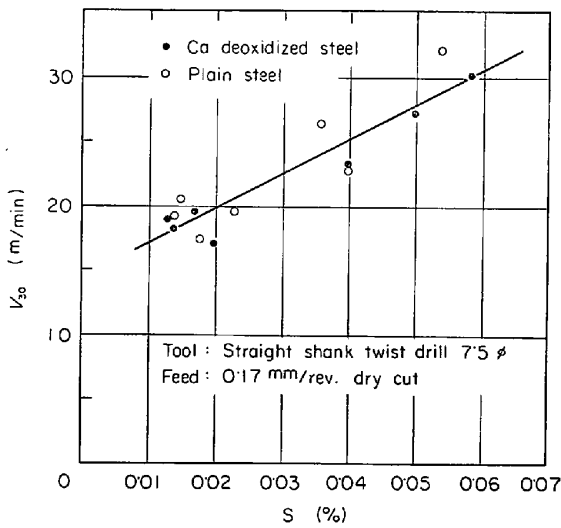


Fig. 14. Relation between S content of medium C steel and V_{30} in drilling with SKH9 tool.

与え、切削温度に影響を与えるような切削機械的变化を生じさせることにより、大きい影響を与えることが認められる。しかし中C鋼ではいわゆるCa脱酸を含む通常の脱酸方式の範囲では高速度鋼工具による切削時の工具寿命特性に大きい影響は与えないようである²⁰⁾。

(4)式はグループⅢの供試鋼群を送り0.25mm/rev., 切込み1.5mmで長手旋削した場合の V_{30} 値を脱酸法、S量、かたさHvで重回帰分析した結果である。この場合、脱酸法の影響は認められていない。重回帰係数は0.88でかたさの寄与が大きい。

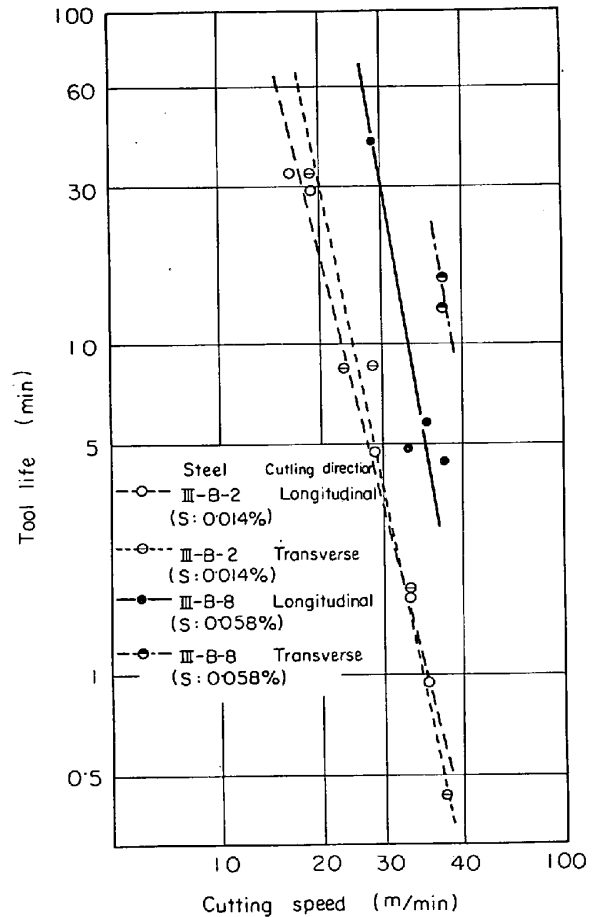


Fig. 15. Dependence of tool life characteristics in drilling medium C steels with different S content on cutting direction.

$$V_{30} (\text{m/min}) = 145.1 - 0.617Hv + 209.2S (\%) \quad (4)$$

Fig. 13はS量、Hvと V_{30} 値の関係を(4)式に基づき3次元表示したもので、個々の実験点もプロットしている。

同じ供試鋼群についてSKH9ドリルを用いて送り0.17mm/rev.で穴あけした場合の工具寿命試験結果をもとにして、総穴あけ深さから実切削時間を換算して V_{30} 値を求め、旋削の場合と同様に重回帰分析した結果を(5)式に示す。この場合も統計的には脱酸法の効果は有意ではなく、またかたさの寄与は非常に小さく、Sの効果のみが認められており、単相関係数は0.90である。

$$V_{30} (\text{m/min}) = 15.2 + 242.3S (\%) \quad (5)$$

Fig. 14に実験点と(5)式に基づく計算結果を図示している。このように切削方法の相異によつて被削性に及ぼす諸因子の影響が異なることに留意する必要がある。

中C鋼では脱酸の影響があまり認められなくなるのは基質中のパーライト割合が大になり、工業的に許容できる範囲の酸化物量の変動範囲において酸化物のアプレッ

シブな作用の相対的な寄与が一因であると考えられる。

Fig. 13, Fig. 14 は切削時の送り方向が長手方向の場合であるが、参考のために Fig. 15 に S 量の異なる 2 つの供試鋼について、送りを長手方向および直角方向に与えた場合の穴あけ時の V-T 線図を示す。低 S 鋼では切削方向の変化により工具寿命特性にほとんど影響しないが、高 S 鋼では送り方向が長手方向の場合より直角方向の場合の方が明らかに工具寿命特性がすぐれている。このことは中 C 鋼でも高 S 水準の場合には脱酸合金などの選択によつて硫化物の形態を変化させ、切削挙動を変化させうる可能性を示唆している。今後とも検討を進める必要があろう。

4. 結 言

低 C の高 S 快削鋼および中 C 鋼の被削性、とくに工具寿命特性に及ぼす脱酸法の影響を調査し、次の諸点を明らかにした。

(1) 低 C の高 S 快削鋼の場合、同様の組成であればリム鋼の中心部の被削性は最もすぐれているが、リム層の被削性は劣っている。Mn-S キルド鋼はリム鋼中心部と同等の被削性を有し、外周部と中心部でその変動は小さい。Si キルド鋼の被削性はかなり劣化する。

(2) 低 C ・低 Si の高 S 快削鋼の場合、工具寿命特性は鋼中の ΣO 量に強く依存し、 ΣO 量が 0.026% 程度で極大値を示し、それ以上になるとむしろ被削性は低下する傾向にある。

(3) 硫化物形態そのものが切削機構的に大きい影響を与え、したがって硫化物の延伸方向に対する切削方向の変化は切削挙動に敏感に反映する。

(4) 含 S 快削鋼の被削性に及ぼす脱酸法の影響は硫化物の性状の変化にともなう切削機構的变化と SiO_2 や Al_2O_3 のような硬質の酸化物による機械的摩耗効果によると考えられるが、MnO などのような酸化物も多量含まれているとゆるい負の効果を有する可能性がある。

(5) 中 C 鋼の場合には脱酸の影響は一般に小さくなる。

以上においては、各種鋼を主として高速度鋼工具で旋削する場合の被削性に及ぼす脱酸法の影響を工具寿命特性の観点で検討した。快削鋼の被削性をよりよく把握す

るためには旋削以外の各種切削法で加工する際の被削性を工具寿命特性、仕上面あらさ、切くず処理性などに関して総合的に調査する必要がある、その際には脱酸法の影響についてもより複雑な議論を必要とする。これらの点については別の機会に検討したい。

文 献

- 1) 成田, 伊藤: 神戸製鋼技報, 17(1967) 2, p. 129
- 2) 精機学会切削性分科会, 精密機械, 34(1968) 10, p. 680, 35 (1969) 3, p. 169, 35 (1969) 4, p. 227
- 3) 鳴滝, 岩田, 山本, 山口: 鉄と鋼, 56(1970) 3, p. 391
- 4) 佐田, 宮下, 西川, 奈良, 耳野: 鉄と鋼, 57 (1971) 3, p. 589
- 5) C. A. MÜLLER, A. STETTER, and E. ZIMMERMANN: Arch. Eisenhüttenw., 37(1966), p. 27
- 6) C. E. SIM and F. B. DAHLE: Trans. AFS, 46 (1958), p. 65
- 7) たとえば, P. L. JACKSON: J. Metals, 18 (1960) 6, p. 725
- 8) L. H. VAN VLACK: Trans. ASM, 45(1953), p. 741
- 9) E. J. PALIWADA: Trans. ASM, 47(1955), p. 680
- 10) E. J. PALIWADA: Trans. ASM, 50(1958), p. 258
- 11) G. B. TROUP: The Metallurgical Influence of Elements and Microstructure on Machinability of Free Machining Steel, Bliss & Laughlin Steel Co., 1964
- 12) D. B. CLAYTON and J. R. BROWN: Iron Steel, 142(1969) 4, p. 219
- 13) R. GAYDOS: J. Metals, 16(1964) 12, p. 972
- 14) W. DAHL, H. HENGSTENBERG, and G. DÜREN: Stahl u. Eisen, 86(1966) 13, p. 782
- 15) R.B.G. YEO: J. Metals, 19(1967) 6, p. 29, 19 (1967) 7, p. 23
- 16) D. RADTKE and D. SCHREIBER: Steel Times, Aug. 1966, p. 246
- 17) 山本, 藤田, 山口, 萩原: 昭和43年度精機学会秋季学術講演会前刷, p. 13
- 18) C. A. MÜLLER and E. ZIMMERMANN: Arch. Eisenhüttenw., 37(1966), p. 146
- 19) 鳴滝, 岩田, 山口, 山本: 精密機械, 34(1968) 12, p. 787
- 20) 山本, 藤田, 山口, 萩原: 昭和45年度精機学会春季学術講演会前刷, p. 333