

論 文

UDC 669.14.018.8-138.8 : 621.7.01 : 669.775

SUS 304 L 焼結ステンレス鋼の被削性とそれに
及ぼす S 添加の効果*

加藤 哲男**・草加 勝司***・久田 建男***

On the Machinability of SUS 304 L and S-bearing 304L-type
Sintered Stainless Steels

Tetsuo KATO, Katsushi KUSAKA, and Tatsuo HISADA

Synopsis:

An investigation was made of the influence of pressing and sintering conditions, and S addition up to 0.4% on the machinability of 304 L sintered stainless steels manufactured by the water-atomized powders.

The results were as follows.

(1) The sintered density gave remarkable influence on cutting resistance. The resistance got smaller first, and then larger with increasing density, having the minimum value around 7 g/cm^3 of density.

(2) There occurred a change of the shape and the density of cutting chips with the density of materials. The resistance got larger in proportion to $\Delta D = |D_s - D_c|$, where D_s , D_c were the density of specimens and chips, respectively.

(3) Sulphur addition had no influence on original powder characteristics. Cutting resistance decreased with increasing amount of S, and accordingly, tool life could be remarkably improved.

1. 結 言

粉末冶金はプレス焼結工程のみで同一形状の焼結部品を量産できることを特徴とし、本来切削加工の省略をはかる方向に発展してきた。しかしその発達とともに焼結部品の適用範囲がより精密で複雑な形状にまで拡大され、それにともない焼結後切削加工を行う部品が増加してきている。例えば横孔や細溝などを有する形状の部品もプレス焼結で製造され、そのため切削加工が不可欠となつてきている。従つて焼結部品の形状設計にあつて粉末冶金的な手法に切削加工をうまくかみ合わせることも重要となつており、そのためには焼結材の被削性や切削機構について考慮する必要が生じている。

これに対し焼結材の被削性に関する報告^{1)~5)}は数少なく、特に焼結ステンレス鋼については工具寿命についての簡単な調査例³⁾⁴⁾があるにすぎない。ステンレス鋼は本来切削加工が困難とされ、焼結部品においてもその被削性を改善することは實際上意味のあることと考える。

そこで SUS 304 L 焼結体を対象にプレス焼結条件や焼結材の特性と被削性との関係を調査し、さらに粉末への S の添加効果についても試験を行うこととした。

2. 試料および試験方法

水噴霧法⁶⁾により SUS 304 L 相当の 19Cr-10.5Ni を基本組成とし、これに S を 0.4% まで添加した粉末を 5 種類製造した。この際 C, Si および Mn 量は粉末冶金用のステンレス鋼粉に適した範囲⁷⁾に調整した。粉末はいずれも -100 メッシュに分級し試験に供した。その化学成分を見掛密度、粒度分布とともに Table 1 に示す。このうち見掛密度は JIS Z 2504 により測定し、粒度分布は JIS Z 8801 規定のふるいをを用いロータップ試験器にて測定した。

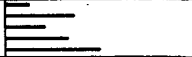
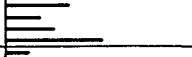
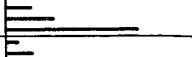
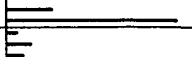
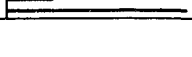
プレス特性については JSPM 標準 1-64 に準じた金型を用い、各粉末を 5 t/cm^2 で成形したときの圧粉密度を測定した。なお潤滑剤としてステアリン酸亜鉛を 1% 混入した。

* 昭和 54 年 8 月 28 日受付 (Received Aug. 28, 1979)

** 大同特殊鋼(株)中央研究所 工博 (Central Research Laboratory, Daido Steel Co., Ltd.)

*** 大同特殊鋼(株)中央研究所 (Central Research Laboratory, Daido Steel Co., Ltd., 2-30 Daido-cho Minami-ku Nagoya 457)

Table 1. Characteristics of tested stainless steel powders.

No.	Chemical composition (%)						Apparent density (g/cm ³)	* Size distribution (%)	** Green density (g/cm ³)	*** Sintered density (g/cm ³)	*** Linear shrinkage (%)
	C	Si	Mn	S	Ni	Cr					
1	0.018	0.90	0.21	0.012	10.49	18.78	2.55		6.29	6.50	1.0
2	0.027	0.86	0.25	0.151	10.56	18.95	2.77		6.18	6.43	1.6
3	0.029	0.79	0.22	0.158	10.57	19.11	2.90		6.19	6.46	1.7
4	0.016	0.85	0.09	0.218	10.54	18.83	2.75		6.13	6.52	2.2
5	0.018	0.89	0.07	0.396	10.56	18.85	3.12		6.13	6.54	2.4

No. 1 : SUS 304 L

* Sieve analysis : 100/150, 150/200, 200/250, 250/350, -350 mesh fraction to lower, respectively (in histogram)

** Compacting pressure : 5 t/cm²

*** Sintering : 1200°C×1h in vac

Linear shrinkage : Direction of diameter

Table 2. Cutting conditions of drilling and turning for measurement of cutting force and tool life.

	Drilling		Turning
	Cutting force	Tool life	Cutting force
Tool	SKH 9, $\phi 10$ point angle 118°	SKH 9, $\phi 5$ point angle 118°	P 20 (0, 6, 6, 6, 8, 0, 0)
Feed rate (mm/rev)	0.10	0.07	0.20
Depth of hole (mm)	13	15	
Depth of cut (mm)			2.0
Max. cutting speed (m/min)	10	7~30	
Cutting speed (m/min)			100

これら圧粉体は 500°C で脱ろう後 1200°C で 1h 10⁻³ Torr の真空中で焼結し、密度と半径方向の収縮率を測定した。これら結果を圧粉密度とともに Table 1 に付記した。引張試験片は JSPM 標準 2-65 に準じた形状に、また切削試験片は $\phi 33 \times 35$ の寸法にいずれも 2~8 t/cm² の範囲で成形し、同様の焼結条件で作製した。後者は焼結後コイニングまたは焼結鍛造を行うことにより焼結密度 7.2 g/cm³ 以上の試験片も作製した。いずれも加工歪の影響を小さくするために 1200°C×1h 真空中で再焼結し、溶製材とともに試験に供した。

被削性については Table 2 の条件でドリル切削試験を行い、切削抵抗および工具寿命を求め、一部については旋削試験も行った。試験はいずれも乾式で行い、工具寿命はドリルが切削不能に至るまでの穴の深さの総計で評価した。これらの切削試験中に発生した切屑について色および形状を観察し、またベックマン製の空気比較式比重計により密度を測定した。加工後、ドリル穴を観察

し、表層の硬さ分布も測定した。このうち S 添加材については硫化物の分布を光学顕微鏡により観察するとともに定電位電解法⁸⁾で硫化物を抽出し、その形態を X 線回折により同定した。

3. 試験結果および考察

3.1 SUS 304 L 焼結材の被削性について

焼結材の諸特性には成形圧力、焼結温度などのプレス焼結条件⁹⁾の影響が認められているが、これらは被削性にも影響を及ぼすと予想されるので、まず S を添加しない No. 1 の SUS 304 L 粉末についてそれらの関係を調べる試験を行った。

Fig. 1 に、2~6 t/cm² で成形しその後、真空中 1200°C で焼結した試片について成形圧力とドリル切削試験による切削抵抗の関係を求めた結果を示す。合わせて測定した焼結密度の値も示した。成形圧力の増大に伴って焼結密度が増加しているが、切削抵抗は減少する傾向を

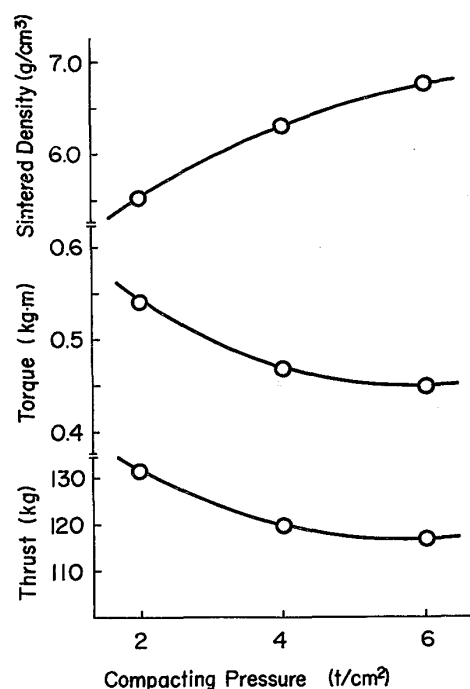


Fig. 1. Influence of compacting pressure on sintered density and cutting force during drilling in SUS 304 L compacts sintered at 1 200°C for 1 h in vac.

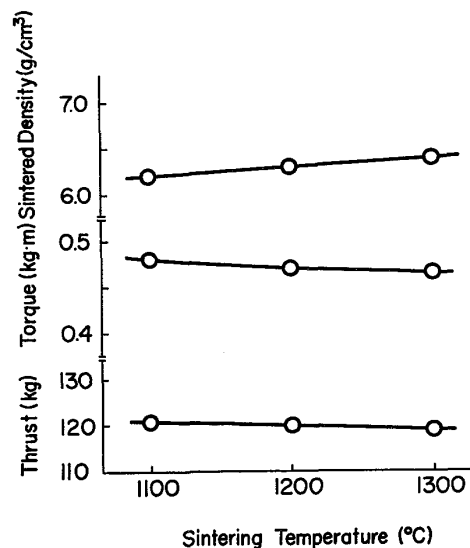


Fig. 2. Influence of sintering temperature on sintered density and cutting force during drilling in SUS 304 L compacts sintered at 1 100-1 300°C for 1 h in vac.

示している。

Fig. 2 は 4 t/cm² で成形後、真空中 1 100~1 300°C で焼結した試片について焼結温度とドリル切削抵抗の関係を示す。焼結温度の上昇に伴い焼結密度が上昇し、切削抵抗は減少する Fig. 1 と同様の傾向が見られる。

この Fig. 1 と 2 の結果から焼結密度と被削性との間

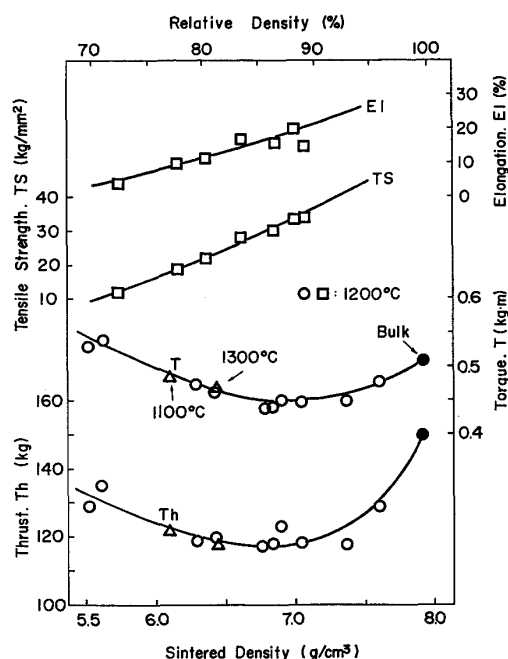
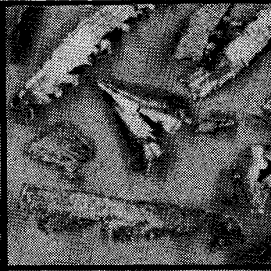
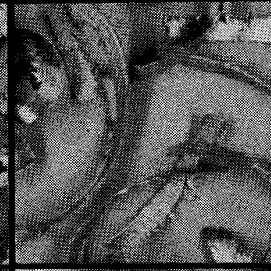
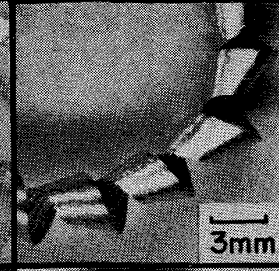
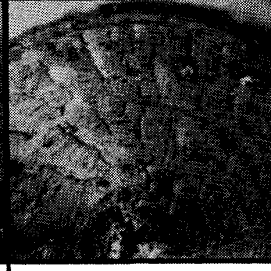
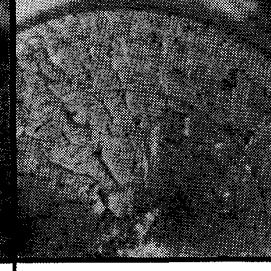
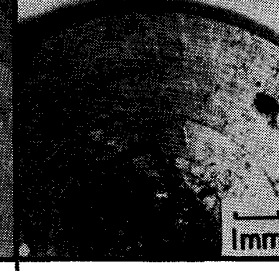


Fig. 3. Influence of sintered density on tensile properties and cutting force during drilling in SUS 304 L compacts sintered at 1 100-1 300°C for 1 h in vac.

に一義的な関係が予測されたのでその関係を求める整理を行つてみることにした。Fig. 3 は焼結密度について、焼結鍛造をも含めた広範な範囲にとり、焼結密度とドリル切削抵抗および機械的性質との関係を求めた結果を示す。機械的性質は密度の増加に伴い既によく知られているように単純に向上しているが¹⁰⁾、切削抵抗は焼結密度が約 7 g/cm³ 付近までは密度の増加につれ減少し、それから高密度になると抵抗は再び増加している。この曲線を高密度側に外挿した結果は溶製材の値と等しくなっている。

これら切削抵抗を測定後、切屑の形状および密度、ならびにドリル穴の切削面およびマイクロ組織を調査した。Photo. 1 に切屑およびドリル穴の切削面を示す。焼結密度が 5.55 g/cm³ の試片ではドリル穴先端部に大きなき裂が認められ、ドリル刃先が切屑を掘りおこしながら進んでいることが容易に推定される。この場合の切屑形状はむしり型であり切屑厚さが厚く、酸化色もつき切削温度の高かつたことを示している。このような状態は焼結密度の増加に伴い見られなくなり、切屑はしだいに長く伸びるようになる。それと伴にドリル穴のむしれも少くなり、焼結鍛造した 7.60 g/cm³ の密度の試片では溶製材に近い切削面となる。

Photo. 2 は 5.55 および 6.90 g/cm³ の焼結密度に対応するドリル穴縦断面のマイクロ組織を示す。表層は切削

	P/M		P/M Forging	Bulk
Cutting Chips				
Drilled Hole				
Ds	5.55 g/cm ³	6.90	7.60	7.93

D_s : Sintered Density

Photo. 1. Cutting chips and surface of drilled hole in SUS 304 L compacts sintered to various densities.

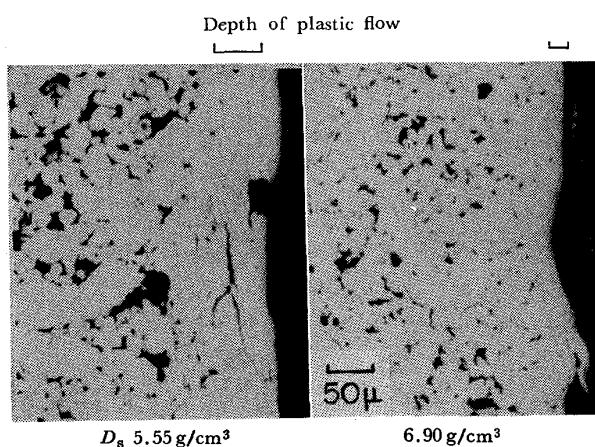


Photo. 2. Vertical-section microstructures of drilled hole in SUS 304 L compacts sintered to various densities.

加工時の塑性流動により変形を強くうけ気孔はつぶされている。塑性流動層は焼結密度の低いものの方が厚く、流動層の中にき裂も認められ、切削面付近は強加工をうけていることが推定される。このドリル穴表層からの硬さ分布を調べた結果を Fig. 4 に示す。切削前の焼結密度の低いものの方が硬化深さが深く、Photo. 2 に示した流動層の厚さとよく対応している。これらの現象はドリル穴先端部においても同様に観察されている。

Fig. 5 はドリル切削抵抗試験で発生した切屑の密度と焼結密度との関係求めた結果を示す。切屑の密度は

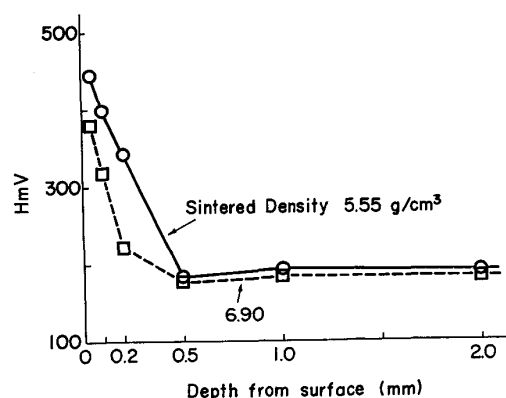


Fig. 4. Distribution of micro-vickers hardness on the surface layer of drilled hole for SUS 304 L compacts sintered to various densities.

切削試験片の密度が 7 g/cm³ まではほぼ 7.3 g/cm³ と一定値を示し、7 g/cm³ 以上の焼結材や溶製材ではそれよりやや低くなっている。被削材が加工され切屑になる時の密度の変化量を $\Delta D (=D_c - D_s)$ 、 D_s : 試片の焼結密度、 D_c : 切屑の密度) で表すと、約 7 g/cm³ までは ΔD はプラスでありすなわち切屑密度は試片密度より増加し、7 g/cm³ 以上では ΔD はマイナスであつて、すなわち切屑密度は減少している。これを Photo. 1 に示した切屑形状と対比すると、低密度材の切屑は不連続なむしり型であるのに対し、6.9 g/cm³ では切屑は連続型に移行し、更に高密度化すると連続型だけになることがわ

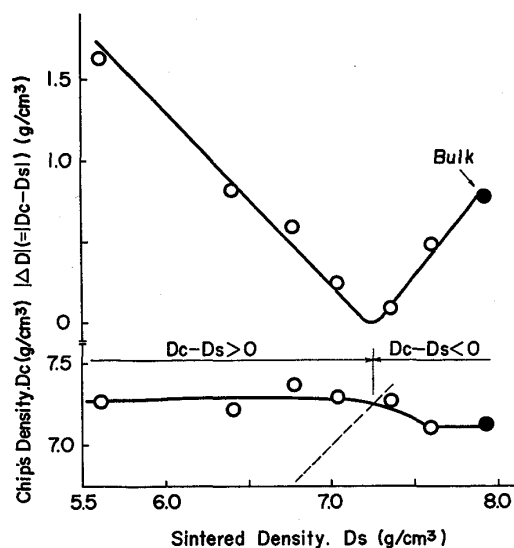


Fig. 5. Influence of sintered density on cutting chip's density and $|\Delta D|$ in drilling for SUS 304 L compacts sintered at 1200°C for 1 h in vac.

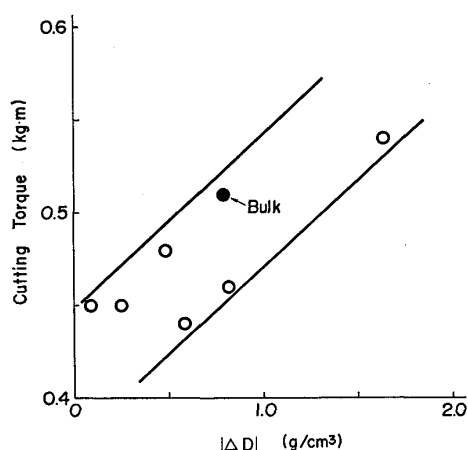


Fig. 6. Relationship between cutting torque and $|\Delta D|$ in drilling for SUS 304 L compacts sintered at 1200°C for 1 h in vac.

かる。この切屑形状を ΔD と対比させると不連続型の場合には ΔD はプラス、連続型の場合には ΔD はマイナスになっており、切屑の形状により ΔD が変化するといえることができる。

Fig. 6 は ΔD の絶対値 $|\Delta D|$ と切削トルクとの関係を求めた結果を示す。切削トルクは溶製材の結果も含めて $|\Delta D|$ で整理され、 $|\Delta D|$ が大きくなる程切削トルクも大きくなる傾向を示している。一般に切削エネルギーは被削金属の切削面の変形および切屑への金属の変形に消費されるが¹¹⁾、焼結材ではさらに切屑への密度変化がおこつて、それに必要なエネルギーとしても使われるため、 $|\Delta D|$ に比例して切削抵抗が増大する傾向が現れたもの

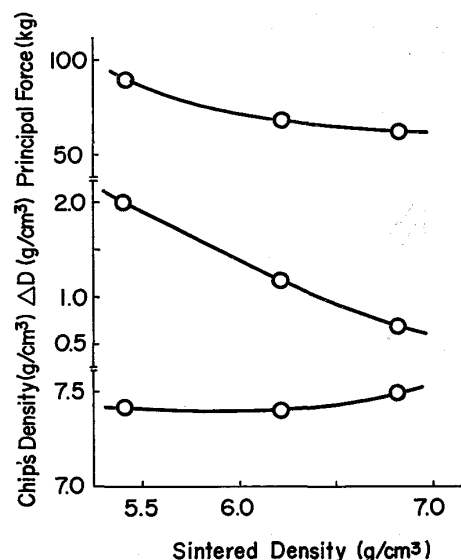


Fig. 7. Influence of sintered density on cutting chip's density and principal force in turning for SUS 304 L compacts sintered at 1200°C for 1 h in vac.

といえることができる。

この切屑密度の変化の状況をさらに調べるために Table 2 の条件で旋削試験も行つた。その結果を Fig. 7 に示す。先のドリル試験と同様、焼結密度にかかわらず切屑密度 D_c がほぼ一定値を示し、低密度域では $|\Delta D|$ が大きく、同時に切削抵抗が大きくなる傾向を示す。従つて焼結材の切屑密度変化は切削加工法および条件とは関係なく現れ、切削抵抗に大きな影響を及ぼす焼結材特有の現象であると考えられる。

以上より SUS 304 L 焼結材の被削性は、その密度により①試片の密度、強度および延性が低く切削抵抗の大きい低密度域②切削抵抗が最も小さくなる中密度域③密度、強度および延性の向上とともに切削抵抗の大きくなる高密度域の3段階に分類でき、これら各段階に対応した切削機構は次のように推定される。

気孔の多く存在する低密度域では切屑はむしり型となる。一般の溶製材においてはむしり型の切屑は延性の大きい材料を潤滑の悪い条件で切削した場合に現れやすい¹²⁾が、気孔を多く有する低い密度の焼結材は圧縮に対して非常に大きな変形能を有することより、今回の無潤滑の条件下での切削機構は延性の大きい材料の場合と似た取扱いができるものと推定される。すなわち低密度域では切削加工中に材料は圧縮応力を受けて高密度化しながら切屑に変化し、やがて切屑となつて分離する。この切屑の高密度化のために余分な変形エネルギーを必要とし切削抵抗は大きくなる。この変形をうけた結果として被削

材には Photo. 2 および Fig. 4 のごときマイクロ組織の変化や加工硬化が現れる。また切屑が被削材より分離した跡は Photo. 1 に示したドリル穴の溝となつて残る。切屑は圧縮、分離をくり返し順次排出されるため形状は不連続型となる。

中密度域では切屑形状は連続型と不連続型の混合したものとなり、切屑厚さは薄くなる。この密度域では気孔が少なくなるため、低密度域のように被削材に大きな変形は現れにくくなる。さらに Photo. 1 に見られる薄く剪断された切屑形状から気孔はむしろ応力集中源として作用し、切屑の密度変化に必要なエネルギーも小さく、切削抵抗の上昇がおさえられたものと考えられる。

次の高密度域では気孔はさらに減少するため応力集中効果は小さくなり、切屑は Photo. 1 のように連続型となる。この高密度化により機械的性質も向上し、切削に消費されるエネルギーも大きくなるため、切削抵抗は密度に比例して大きくなる。この切削抵抗を高密度側に外挿した結果は溶製材に等しくなり、切屑形状も似たものとなつている。

3.2 被削性に及ぼす S 添加効果

一般の溶製材では S は快削性添加元素の 1 つとして添加されるが、通常 MnS の形態で鋼中に存在し特に低速度切削における工具寿命を改善¹³⁾するといわれる。粉末冶金用ステンレス鋼粉は粉末特性上通常 Mn⁷⁾ は低レベルにおさえられているため、溶製材の場合と異なることが考えられるので改めて S 添加による被削性への影響について調査した。

ところで一般に溶鋼中に S を添加すると溶鋼特性が変化¹⁴⁾するため、溶湯噴霧して得られる粉末の性状やプレス焼結性にも影響をおよぼすが、本供試粉は噴霧条件のコントロールにより⁶⁾、Table 1 に示すごとく基本組成粉とほぼ同様の粉末特性に調節した。

まず Fig. 8 は焼結材の機械的性質およびドリル切削抵抗と S 含有率の関係を求めた結果を示す。この場合、焼結密度の影響を避けるために試片の密度は 6.5 g/cm³ になるように成形圧力を調節した。引張強さに及ぼす S 添加の影響は無視できるが、伸びは S 添加に比例して小さくなり、延性を劣化させている。切削抵抗は S 添加に比例して小さくなつており、S は焼結材の被削性改善に効果があることを示している。

Fig. 9 は No. 4 および No. 5 について焼結密度を広範な範囲にとつた焼結材に対して、ドリル切削試験を行った結果を示す。S 添加により全体的に切削抵抗は小さくなり、特に低密度域における切削抵抗の上昇が大ききおさえられている。

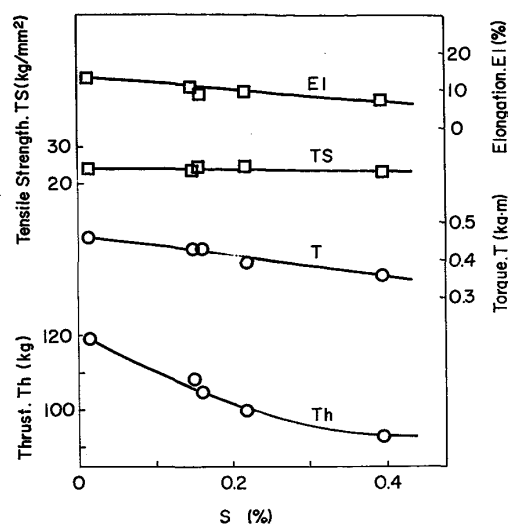


Fig. 8. Influence of amount of S-addition on tensile properties and cutting force during drilling in SUS 304 L-type compacts vacuum-sintered to 6.5 g/cm³ of sintered density.

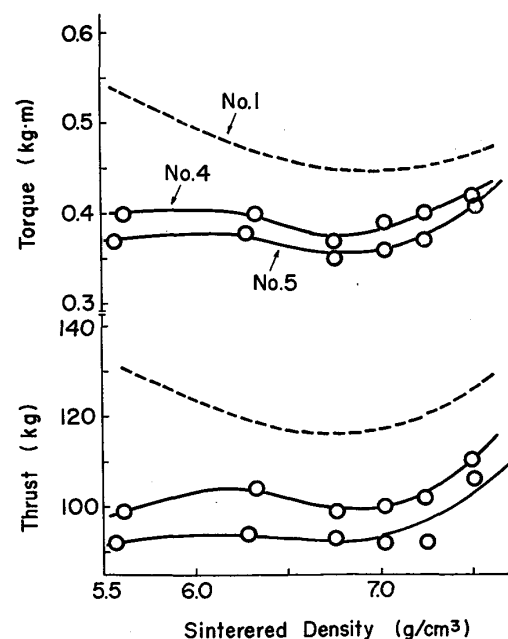


Fig. 9. Relationship between sintered density and cutting force during drilling in S-bearing 304 L-type compacts sintered at 1200°C for 1 h in vac.

Photo. 3 は S 添加材の切削およびドリル穴の切削面を示す。S 添加により低密度域でも切屑は薄く剪断され、切削面のむしれも無添加の場合に比べ著しく小さくなつている。S 添加材では無添加で切削抵抗の小さくなる中密度域と比較しても $|4D|$ は例えば焼結密度が 6.67 g/cm³ の場合 0.56 g/cm³ となり、Fig. 5 に示した無添加の結果と比べ約 7% 小さく被削性の向上をうら

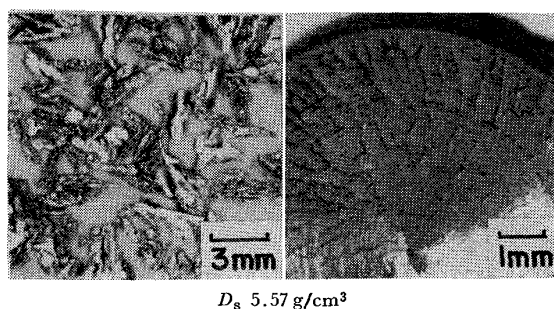


Photo. 3. Cutting chips and surface of drilled hole in sintered specimen by No. 5 powder.

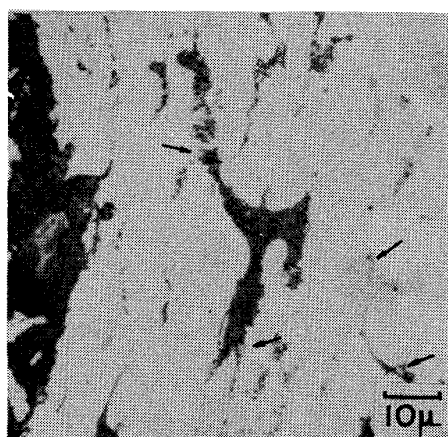


Photo. 4. Sulfides observed at pseudo-boundary of sintered specimen (by No. 5 powder) where micro-crack was initiated by drilling.

づけている。

Photo. 4 は切削後のドリル穴の縦断面のマイクロ組織を示す。数 μ 程度の大きさの硫化物が粉末粒内および粒界に認められる。切削時にこの硫化物を起点としてマイクロクラックが多数発生しており、切屑が薄く剪断されやすい状態になっていることが推定される。

この硫化物の形態を調べるために焼結材を電解し、抽出残渣をX線回折により分析した。Fig. 10 にその結果を示す。Sは主に CrS の形で存在しており、 MnS の回折線ピークは認められない。その他、噴霧時に形成されたと思われる Cr_2O_3 と $\alpha\text{-SiO}_2$ も検出されている。

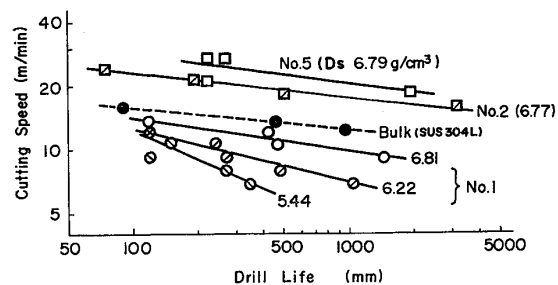


Fig. 11. Relationship between cutting speed and drill life for SUS 304 L and S-bearing 304 L-type compacts sintered at 1200°C for 1 h in vac.

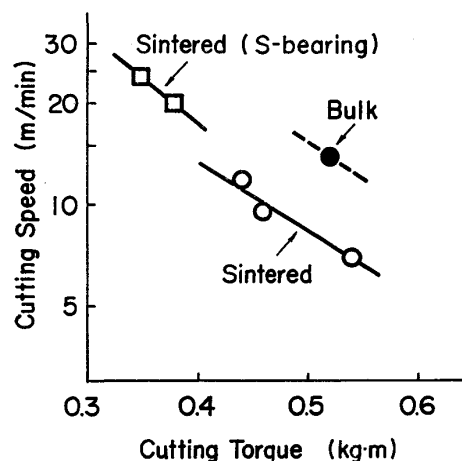


Fig. 12. Relationship between cutting speed and cutting torque at 300 mm of drill life.

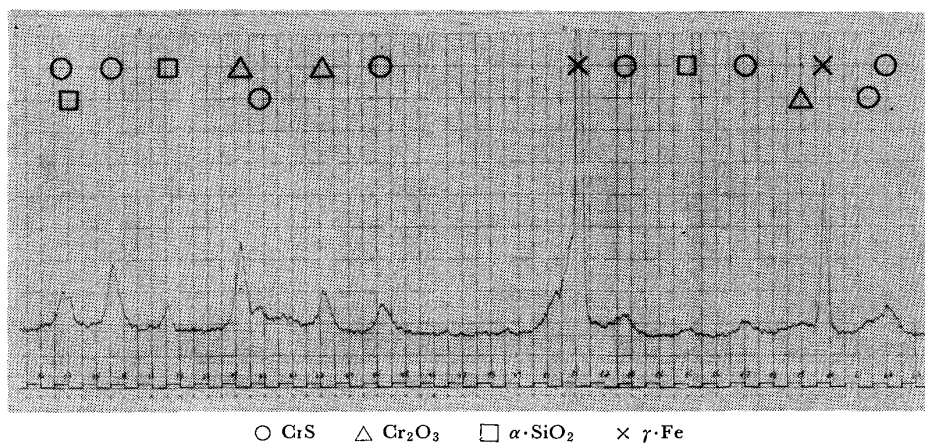


Fig. 10. X-ray diffraction profile of sulfide and oxides extracted from sintered specimen by No. 5 powder.

この CrS が切削時の応力集中源として作用するため、切削加工時に密度増加を受けながらも切屑は薄く剪断される結果、むしろ起こしにくく、S を添加した焼結材では切削抵抗の上昇がおさえられたものと推定される。

Fig. 11 はドリル切削試験の結果により求めた工具寿命に及ぼす S 添加の影響を焼結密度との関係で示す。まず S を添加しない No. 1 の SUS 304 L 粉では焼結密度が高くなるに従って寿命は向上しているが、溶製材と比較するとまだ劣っている。これに対し、S 添加材は無添加材に比べ著しく高寿命となり、S 含有率の増加に伴って寿命が向上することが確認されている。

Fig. 12 は Fig. 9 に示した切削トルクと、寿命が 300 mm の時の切削速度との関係を示す。切削トルクが同じ場合、同じ工具寿命を得るのに、S 無添加の焼結材は溶製材より切削速度を小さくする必要がある。これは気孔が存在するため応力集中効果により抵抗は小さくなるものの、①実質的には断続切削となるため工具がチップングしやすい状況下にあること、②焼結材は熱伝導率が小さく工具が過熱しやすいこと、および③溶製材に比して Fig. 10 にも見られるように酸化物系の硬い介在物が多く、アブレッシブ摩耗をうけやすいことなどによると考えられる。一方、S 添加焼結材では切削抵抗が著しく小さくなるため工具寿命も伸びる傾向が認められている。

4. 結 言

SUS 304 L をベースに S を 0.4% まで添加した粉末を水噴霧により製造し、粉末特性やその焼結体の被削性に及ぼす粉末粒度、プレス焼結条件ならびに S 添加の影響を調査した。結果を要約すると。

1) プレス焼結条件により焼結密度は変化し、切削抵抗に大きな影響を及ぼす。しかしこの切削抵抗の変化は密度との関係で整理され密度が 7 g/cm^3 付近までは密度増加につれ減少し、さらに高密度になると逆に増加する。

2) 焼結密度により切屑の形状および密度が変化する。それとともに切屑の密度と焼結密度の差 $|4D|$ が変化し、 $|4D|$ と切削抵抗は強い相関々係を示す。 $|4D|$ に比例して切削抵抗は大きくなる。

3) 低 Mn の焼結ステンレス鋼では S は CrS の形態

で存在し、添加量に比例して切削抵抗を低減させる。特に S 添加により切削面のむしれがおさえられ、切屑が薄く剪断されるようになるため、無添加では被削性が著しく悪い低密度域での改善効果が大きい。

4) また S 添加によりドリル工具寿命は著しく改善される。溶製材と比較すると焼結材は切削抵抗が低いわりには工具寿命が比較的短い。

以上のように SUS 304 L 焼結材の被削性には焼結密度の影響が強く現れ、また、S 添加により粉末特性をほとんど損なうことなく被削性を大きく改善できる状況が明らかになった。

終わりに、本研究にあたり、切削試験に関して種々ご指導を賜った大同特殊鋼(株)中央研究所研究第 1 部次長阿部山尚三氏ならびに切削試験に協力された第 5 研究室中村貞行氏に厚く感謝の意を表する。

文 献

- 1) 田中義信, 津和秀夫, 大森義市: 精密機械, 31 (1964), p. 100
- 2) 田中三義, 三橋靖郎: 精密機械, 41 (1975), p. 808
- 3) American Machinist, March (1977), p. 72
- 4) O. W. REEN: Int. Powder Met. Conf (USA), 5 (1977), p. 431
- 5) P. J. ANDERSEN and J. S. HIRCHHORN: Int. Symp. on Influence of Met. on Machinability of Steel. Tokyo, (1977), p. 333.
- 6) 加藤哲男, 手塚広吉, 草加勝司, 鈴木喜代志: 電気製鋼, 46 (1975), p. 4
- 7) 加藤哲男, 草加勝司: 粉体および粉末冶金, 22 (1975), p. 1
- 8) 小野清雄, 河野富夫: 鉄と鋼, 64 (1978), p. 1389
- 9) 例えば, R. L. SANDS, J. F. WATKINSON: Powder Met., 5 (1960), p. 85
- 10) 例えば, P. M. FRENCH and P. G. MARDON: Int. J. P/M, 3 (1967) 4, p. 65
- 11) A. M. Розенберг; A. H. Еремін: 金属切削理論, (1965), p. 86 [東京図書]
- 12) 白井英治: 切削研削加工学上, (1974), p. 8 [共立出版]
- 13) C. W. KOVACH, and A. MOSKOWITZ: Metal Prog. July (1970), p. 105
- 14) Ю. А. Грацианов, Б. Н. Путимцев, and А. Ф. Силаев: 噴霧金属粉, (1970), p. 65 [日ソ通信社]