

高炭素高バナジウム高速度鋼に関する研究

KK日本製鋼所 室蘭製作所 研究所*

石 塚 寛

1. 緒 言

高速度鋼は金属の切削加工作業に広く用いられる極めて重要な特殊鋼の一つで、いわゆる18-4-1型のW高速度鋼ならびにこれにCoを添加したものは性能がすぐれ、現在これが標準型の高速度鋼とされている。しかしながらその多量合金元素であるWおよびCo等は資源的に極めて乏しいこと、また近時工作機械の高効率化に伴い高速切削に耐える工具の要求が多くなってきたことなどの点から、切削工具鋼の改良については多人の関心がよせられている。

このため当研究室においては、Wを節減し、しかもW同様わが国の不足資源であるCoおよびMo等を含まずして切削性能のすぐれた高速度鋼として、高C高V型高速度鋼の有望性に着目し、種々研究を重ねた結果、1952年第1表に示す組成の高V高速度鋼(8-4-4型)は強力切削工具鋼としてすぐれた性能を有することを発見した。さらにこの高速度鋼の物理冶金的諸性質について詳細なる研究を行い、従来の高W型高速度鋼との差異を明らかにした。当所において開発されたこの高V高速度鋼は、すでに約10年前より各種工具類として実用に供されているが、以下その諸性質および切削試験成績等を取纏め紹介する。

第1表 高V高速度鋼の代表成分
(特許第200911号、1953年)

C	Si	Mn	P	S	W	Cr	V
1.3~1.5	<0.6	<0.6	<0.035	<0.035	8.0~8.5	4.0~4.5	4.0~4.5

2. 高V高速度鋼を得るに至るまでの基礎研究経過

まずはじめに、参考までに本鋼を得るに至るまでの基礎研究の経過を概述すると次の通りである。

i) MoおよびCoを含まず、1.2~1.4% C、約4% Crを一定として、W量を4%、6%および8%に節減した各種低W高速度鋼に対するVの影響について試験し、それよりこの種の高速度鋼に対してはV量を約4.0~4.5%とするととき最大の第二次硬度を与えるとともに、その切削耐久力を著しく増大せしめ得ることを見出した。こ

の場合、その切削性能はW量の多いものほどすぐれ、8%Wのものすなわち8-4-4型の高V高速度鋼は18-4-1型の高速度鋼を遙かに凌駕するすぐれた性能を有することを明らかにした。

ii) さらに低W高V高速度鋼としてより最適なる組成範囲を明らかにするために、逆にV量を4.0~4.5%とした高V高速度鋼に対するWの影響について試験し、それよりこのような高V型においてはW量を約8.0~8.5%とするととき最高の切削性能を与えることを明らかにした。また合せてWとVとの相互関係について検討を加えた。

iii) 高V高速度鋼におけるCおよびCrの最適含有量を決定するためにそれぞれの影響について試験を行い、Cは1.2~1.5%の範囲、Crは4~5%の範囲が適当であることを明らかにした。

以上の諸試験結果より低W高V高速度鋼として最適性能を与えるW、V、CおよびCr等の各含有量を明らかにしたが、さきに示した第1表は、これらの研究結果に基づく新高速度鋼の特許成分範囲中その代表成分を示したものである。

3. 高V高速度鋼の物理冶金的諸性質

上記の基礎研究により得られた高C高V高速度鋼の物理冶金的諸性質について詳細なる研究を行つたが、ここでは従来の高W型高速度鋼と比較しながらその主要点を述べることにする。

3-1 鍛 造 性

本鋼はC量が高いにもかかわらず可鍛性が極めて良く、火造りが容易である。過去数年間の製造実績によれば、本鋼の鍛造歩留りは18-4-1鋼をむしろ上廻る成績を示している。これはC量が高くともその大部分がVと炭化物形成のために消費され、オーステナイト中に固溶するC量が少いためと考えられる。なお本鋼は3-3で述べるようにその溶融温度が高W型に比べてやや低いから、従来のように鍛造温度を高くすると脆くなり割疵発生などの悪影響を与える。したがってその鍛造温度はやや低く、約1000~1120°Cを最適とする。

3-2 熱 処 理

(1) 焼 鈍

変態点の測定結果から本鋼の焼鈍温度は約970~900°Cを適当とするが、焼入れした試料の焼鈍温度と硬度

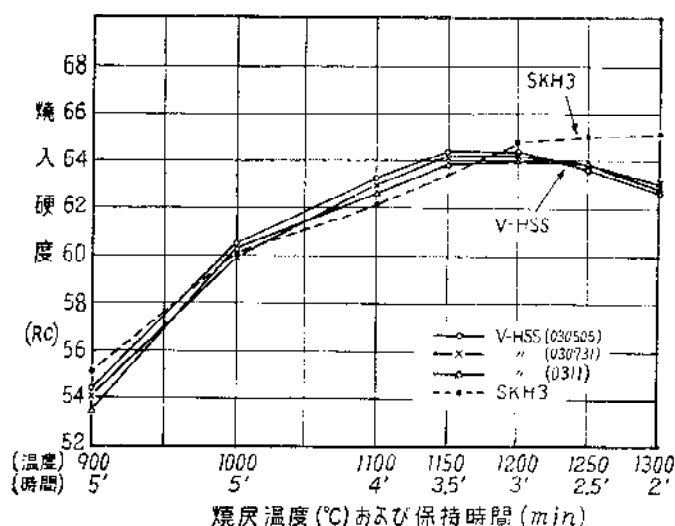
* 室蘭市茶津町4番地

との試験結果から、900°C 加熱が最も軟化しており焼鈍温度として最適である。この場合、本鋼の焼鈍硬度は高W型高速度鋼に比べてやや低値を示し、焼鈍軟化しやすい特徴がある。焼鈍硬度は B.H.N. 約200~250の範囲内にある。なお迅速軟化焼鈍法としての恒温変態焼鈍において、S曲線の過冷オーステナイトの最も不安定な温度は18—4—1鋼と同様に750°Cである。

(2) 焼 入

a) 焼入温度による硬度の変化

第1図は焼入温度900~1300°C 間における本鋼ならびに JIS 高速度鋼第3種 (SKH3) の焼入温度による焼入硬度の変化を比較して示したものである。なお本鋼は3溶解の材料についての試験結果を一所に示した。図に明らかなように、本鋼の焼入硬度の挙動は高W型のそれと多少異なる。すなわち、SKH3 鋼においては焼入温度の



第1図 高V高速度鋼および SKH3 鋼の焼込温度と焼入硬度との関係

上昇に伴って硬度は増加の傾向を示すが、本鋼においては最高焼入硬度を与える焼入温度は低温側にあり、約1150~1200°C から焼入れしたとき最も高い値を示す。さらにそれ以上の高温から焼入れすると比較的多量のオーステナイトを残留するために硬度は低下する。高速度に対する最良の焼入温度は焼入後の性能によつて決定されるが、この点について本鋼の常用焼入温度は工具の種類および形状によつて多少異なるも約1230~1280°Cである。したがつて本鋼の常用焼入温度における焼入硬度は、高W型高速度鋼の場合に比べてやや低値を示す特徴を有する。

なお焼入組織、焼入保持時間の影響、焼入加熱によるオーステナイト結晶粒の変化などについては、紙面の都合上省略する。

b) 加熱温度ならびに保持時間と焼入れとの関係

高速度鋼はその焼入温度が高いために時には表面に焼

入れをおこなうことがある。特に本鋼は3—3で述べるように高W型高速度鋼に比べてその溶融温度が低いために、やや低い温度で焼入れをおこなう。すなわち、焼入温度約1270°C以下では焼入れを生じないが、この温度附近から粗粒破面を呈する。加熱温度が1300°Cに至れば、保持時間約2分以上では焼入れを生じはじめ、時間とともにそれが甚だしくなる。さらにそれ以上に加熱温度が高くなれば試片の角隅が溶融しはじめ表面は凹面となり、焼入れは一層甚だしくなる。したがつて本鋼の焼入温度は1300°C以上に上げないように注意せねばならない。

c) 焼入加熱時の現象

焼入加熱を裸火または普通電気炉によつて行うとき、従来の高W型高速度鋼では加熱温度が約1200~1300°Cになると試片の表面に小さな泡紋を生じ、いわゆる“汗かき”(Sweating)の現象を生ずる。しかし本鋼においては汗かきを生じないか、あるいは生じてても微小にとどまる特徴を有する。また焼入温度が所定温度より高く焼過ぎとなつた場合、高W型では試片の角隅あるいはバイトの刃先などが部分的に膨れ上がる傾向を有するが、本鋼は過熱により逆に表面が収縮し、高C鋼特有のチリメン皺 (Wrinkled surface) を生ずる特徴がある。

なおこのような焼入加熱時における2つの現象の相違から、逆に本鋼と高W型高速度鋼との識別が可能である。

d) 酸化、脱炭および焼割れ

高速度鋼は高温から焼入れするために、焼入加熱のさい酸化脱炭をおこし、それがために焼割れまたは焼戻割れを発生しやすくなる。これらは焼入れした高速度鋼に生ずる大きな欠陥の一つである。この点について本鋼の酸化、脱炭および焼割れ傾向を JIS 規格 SKH2~4A の高W型および Mo系 (W5—Mo4.5—Cr4—V1.5) 各高速度鋼の場合と比較し、その難易を調べた結果は第2表に示す通りである。すなわち、本鋼は高Cであるにもかかわらず他の鋼種に比べて酸化脱炭しがたく、したがつて焼割れをおこしがたい大きな特徴を有する。また焼戻割れも生ずることはない。

e) 結晶粒の粗大化 (フィッシュ・スケール)

Fish scale あるいは Marble fracture とも呼ばれるオーステナイト結晶粒の異常成長も焼入れした高速度鋼に生ずる欠陥の一つであるが、¹⁾²⁾ この点についても本鋼は高Vの影響により他の高速度鋼に比べて結晶粒が異常成長しがたく、したがつてフィッシュ・スケールを生じがたい特徴を有する。(試験結果略)

f) 焼入れによる炭化物の挙動

焼鈍および焼入れした本鋼に存在する炭化物を電解分離法ならびに Point counting 法により定量し、さらに

第2表 各種高速度鋼の酸化、および焼割れの比較

鋼 種	酸化層深サ (μ)		脱炭層深サ (μ)		焼割感受性試験 (試験片寸法 10×10 $\times 40\text{mm}$, 1250°C $\times 3'$ 油焼入)	
	$1250^\circ\text{C} \times 2'$ 油冷 580°C 焼戻	$1250^\circ\text{C} \times 5'$ 油冷 580°C 焼戻	$1250^\circ\text{C} \times 2'$ 油冷 580°C 焼戻	$1250^\circ\text{C} \times 5'$ 油冷 580°C 焼戻	試験本数	焼割本数
V-HSS	16	23	35	46	25	0
SKH 2	20	35	40	69	"	4
SKH 3	46	88	133	169	"	13
SKH 4A	84	128	120	205	"	16
Mo-HSS	96	108	203	367	"	21

抽出炭化物の化学分析とX線回折試験、あるいは腐食による炭化物の識別試験などを行つて、炭化物の組成および結晶型などについて検討を加えた。これらの詳しい試験結果は省略し、結果を要約すると次の通りである。

本鋼に存在する炭化物量は、その合金成分量から理解されるように高W型高速度鋼より少く、SKH3鋼のおおよそ $\frac{1}{2}$ 程度である。例えば焼鈍状態において、面積比として約16%、重量比として約18%の炭化物を含む。炭化物は焼入れによつてオーステナイト中に固溶し、その量を減ずるが、焼入温度の上昇に伴う炭化物量の低下は高W型の場合に比べてやや緩慢である。

次に焼鈍状態における炭化物は主としてW、VおよびFeよりなり、ほかに若干量のCrとCを含む。その結晶型はMC型および M_6C 型であるが、なおそれに附随して $M_{23}C_6$ 型炭化物も僅かに認められた。これを焼入れすると、温度の上昇に伴つて炭化物中のFeおよびCrは急激に減じ、未溶解炭化物はWとVを主体とする。この場合、WとVの比率は鋼そのものの組成に比例し、ほぼ2:1の割合にある。この未溶解炭化物の結晶型は、焼入温度が低い場合はMC型と M_6C 型であるが、焼入温度が高くなるとMC型のみが見られ、 M_6C 型は認めがなくなる。この事実ならびに炭化物の腐食による識別試験結果から、本研究によるような低W高V高速度鋼におけるMC型炭化物は比較的多量のWを固溶した(V, W)C炭化物であろうと考えられ、それがためにWを主体とするところの M_6C 型炭化物の存在量は極めて少い。

(3) 焼 戻

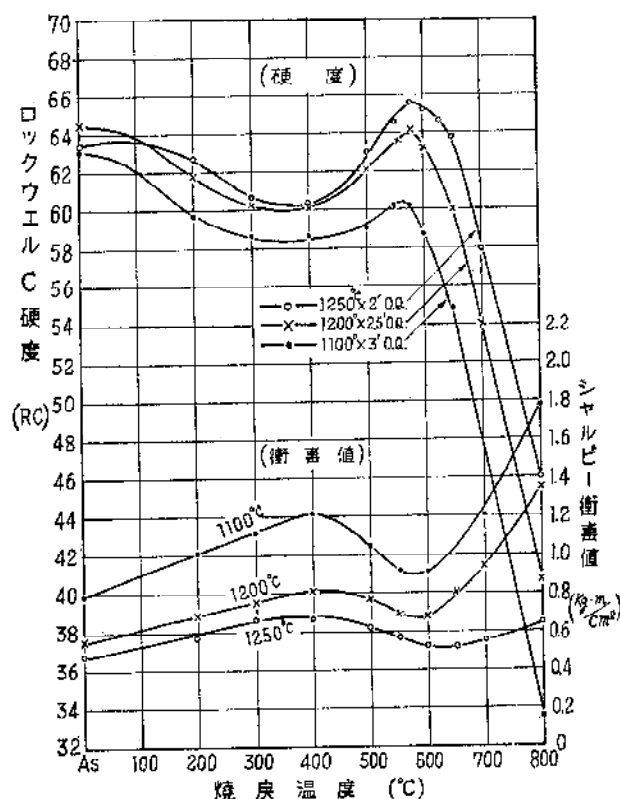
a) 焼戻温度の影響

焼入れした高速度鋼を $550 \sim 600^\circ\text{C}$ に焼戻すとその硬度を増加し、いわゆる焼戻硬化(第二次硬化)の現象をあらわすことは周知の事柄である。この第二次硬化は、その焼入温度、焼戻温度あるいは焼戻保持時間などによつても異なるけれども、高速度鋼の組成によつても大いに異なる。

第2図は種々の温度より焼入れした本鋼の焼戻温度に

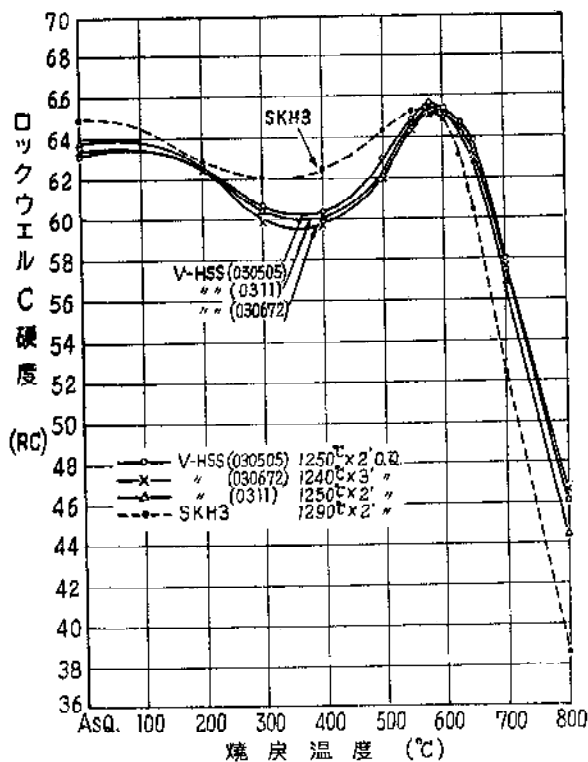
よる硬度の変化を示したものである。図に明らかな通り、第二次硬化の程度は焼入温度の高低によつて著しく異なるのであり、焼入温度の低い場合には $550 \sim 600^\circ\text{C}$ の焼戻しによる硬化の程度は極めて小さいが、焼入温度の上昇に伴つて著し

く硬度の増加を示す。また焼戻しにより最高硬度を示す焼戻温度は、焼入温度の上昇に伴つてやや高温側に移行する。



第2図 高V高速度鋼の焼戻温度と硬度ならびに衝撃値との関係(焼戻時間 20分)

なお第2図には焼戻温度による衝撃値の変化を付記してある。焼戻状態の衝撃値は硬度変化に対応して変化していることがわかる。すなわち、衝撃値は硬度の低下する $300 \sim 400^\circ\text{C}$ の焼戻しで一旦上昇するが、第二次硬化がおこりはじめると低下しだし、最高硬度で極小を描いて、軟化とともに再びその値を増す。その焼戻しによる変化の傾向は各焼入温度の場合を通じ同じであるが、焼入温度が高く、硬化の十分な場合には全体的に衝撃値は低い。



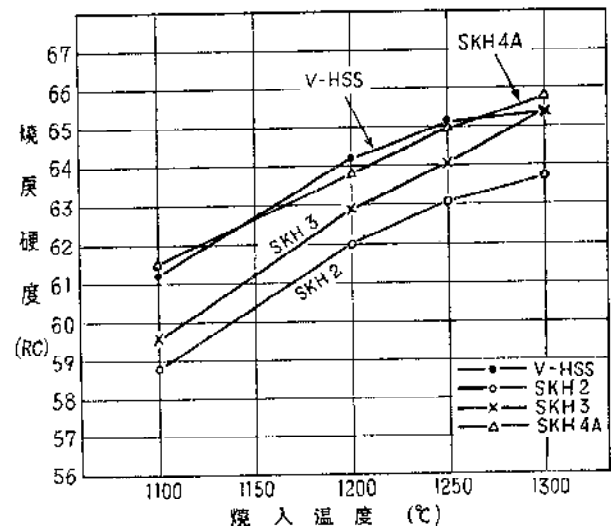
第3図 高V高速度鋼およびSKH3鋼の焼戻温度と硬度との関係（焼戻時間 20分）

次に第3図は本鋼の焼戻温度による硬度変化を、Coを含む高W型であるSKH3鋼と比較したものである。焼戻温度はいずれも常用される温度範囲のもので、SKH3は高めである。なお本鋼は3溶解の材料についての試験結果を一所に示した。図に明らかなように、焼戻温度300～400°Cにおける硬度の谷はSKH3に比べて本鋼はかなり深い。400°C以上における第二次硬化度は極めて大きい。またSKH3鋼は焼入硬度と最高焼戻硬度とはほぼ同程度であるのに対し、本鋼においてはすでに述べたように焼入硬度はやや低いが高焼戻硬度はそれよりも高値を示す。すなわち焼戻しによる硬化が高W型より大きい。次に最高焼戻硬度を示す焼戻温度の極大点とは約575°C付近であるが、その極大範囲はSKH3に比べて本鋼の方が高温側によつてゐる。さらに本鋼の600°C以上の焼戻温度における硬度の低下割合は、SKH3の場合に比べて小さい。このことは本鋼の焼戻硬度の高温における安定性、つまり焼戻軟化に対する抵抗性の大きいことを示すもので、これは本鋼の高速度切削工具鋼としてのすぐれた特性の一つである。

b) 焼入温度と焼戻硬度との関係

第4図は本鋼とSKH2, 3, 4A各高W型高速度鋼について、1100～1300°C間種々の温度より焼入れし、のち580°Cに焼戻したときの焼戻硬度を比較したものである。高W型においてはSKH2, 3および4Aの順に、つまりCo含有量を増すほどその焼戻硬度は高値を示すが、

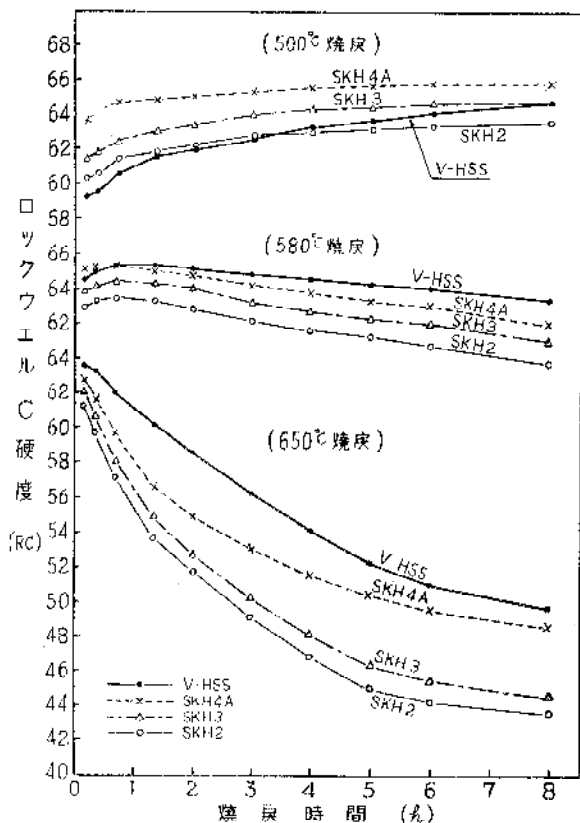
これらと本鋼とを比較すると、本鋼の焼戻しによつて得られる硬度は極めて高いものであることがわかる。すなわち本鋼の焼戻硬度は、焼入温度1250°CまではSKH4A鋼とほぼ同等の値を示し、1300°C焼入れではSKH3鋼と等しく、焼戻硬度が高いという特徴を有する。なお本鋼においては1250～1300°C間の焼入れで得られる焼戻硬度は大差なく、また1200°C焼入れにおいてもかなりの高硬度を得ることができるから、焼入温度範囲が広い。



第4図 各種高速度鋼の焼入温度と焼戻温度との関係（焼戻温度：580°C）

C 焼戻時間の影響

一般に焼戻しの効果は焼戻温度と焼戻時間との相関関係によつて定まる。第5図は本鋼ならびに比較のためにSKH2, 3, 4A各鋼の焼戻硬度におよぼす焼戻時間の影響を、焼戻温度500, 580および650°Cの場合について示したものである。ただし焼入温度はいずれも1260°Cである。まず焼戻温度500°Cの場合についてみると、この温度は第二次硬化の途上にあるために保持時間の増加に伴い硬度は上昇する。この場合、本鋼においてはすでに述べたように焼戻温度300～400°Cの硬度の谷がかなり深いために最初の硬度は低いが、保持時間の増加に伴う硬度上昇の割合は高W型の場合より大きい。次に第二次硬化を示す580°C焼戻しにおいては、保持時間約40～60分で硬度は最高値を示し、以後時間の増加に伴って硬度は低下する。この場合、本鋼においては長時間の保持による硬度低下は緩慢で、その程度は高W型より小さく、また保持する硬度も高い。さらに650°C焼戻しにおいては、保持時間とともにその硬度は急激に低下するが、硬度低下の割合は580°C焼戻しの場合と同様に本鋼が最も小さく、かつその硬度値も高い。すなわちこのことは前にも述べたように、本鋼の焼戻硬度の高温における安定性が高く、焼戻抵抗性の極めて大きいことを示すもので



第5図 各種高速度鋼の種々の焼戻温度における焼戻時間と硬度との関係 (1260°C×3' 油焼入)

ある。

d) 繰返し焼戻しの影響

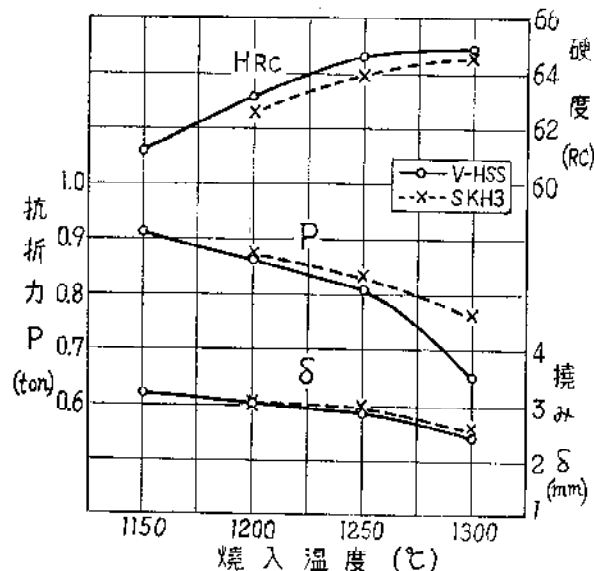
すでに述べたように焼入れした高速度鋼を焼戻すと第二次硬化の現象をあらわし硬度を増すが、この場合、焼戻しを数回繰返すときは単一焼戻しに比べてさらに硬度を増すことはよく知られている事柄で、これは特に Co 高速度鋼において有効である。この点について本鋼の繰返し焼戻しによる硬度の変化を測定した結果、本鋼は Co を含有する SKH3 および SKH4A 鋼と全く同様に、焼戻しを3回まで繰返すときは硬度の増加をきたし、繰返し焼戻しの効果が認められた。(試験結果略) なおこの場合、高W型高速度鋼において、SKH2 は焼戻しを3回以上、SKH3 および 4A では4回以上繰返すとき硬度はかえって低下するが、本鋼においては既述のように焼戻軟化に対する抵抗性が大きいために焼戻しを4回以上繰返してもその硬度低下は極めて軽微で、硬度はあまり変らない。

e) 焼入温度と焼戻後の靱性の関係

高速度鋼の品質を決定する主因子は何んといつても切削耐久力であるが、靱性ということもまた重要な要素である。著者は本鋼の靱性について抵抗力試験を行った。なおこの際、SKH3 鋼についても同様の試験を行い本鋼との比較に供した。ただし抵抗力試験片の寸法は 10mm ϕ × 165mm/とし、種々の温度より焼入れ後、590°C で

2回繰返し焼戻した状態のものについて試験を行った。試験要領は圧子の半径17.7mm、スパン間隔125mmとして、アムスラー試験機を用いて静的曲げ試験を行い、試験片が折損するまでの荷重および撓みを測定した。また試験に供した丸棒試料の両端面についてその硬度を測定した。

第6図にこの試験結果を示す。すなわち、焼入温度の上昇に伴って抵抗力は低下するが、その低下の割合はSKH3に比べ本鋼の方が大きい。特に焼入温度が1250°C以上において両者の値にひらきが出ている。これは撓みについても同様であるが、この場合は両者の差は極めて僅少である。しかしさきに示した第4図の結果から明らかなように、本鋼の焼戻硬度はSKH3に比べて低い焼入温度で十分な値を示すのであり、本鋼は約1250°C焼入れを、またSKH3は約1300°C焼入れをそれぞれ最良とし、これを常用焼入温度としている。したがって抗折力および撓みの比較は、両鋼種のそれぞれ常用焼入温度における値についてなすべきである。かかる観点から第図をみれば、本鋼の1250°C焼入れの場合の抵抗力および撓みは、SKH3の1300°C焼入れのものより高い値を示し、良結果を得ている。すなわち本鋼は、高Cであるために生ずる靱性の低下という点については何等心配する必要はなく、常用焼入温度における焼戻後の靱性は良好である。



第6図 高V高速度鋼及びSKH3鋼の焼入温度と硬度、抗折力ならびに撓みの関係 (焼戻温度590°C、2回焼戻)

f) 焼戻硬化現象

高速度鋼の第二次硬化の原因については従来多くの研究が発表されたが、近年焼戻しにおける炭化物反応の研究^{3)~6)}と相俟つてその機構がほぼ明らかにされてい

る。すなわち第二次硬化は、合金元素を過飽和固溶した基地より特殊炭化物の微粒析出、ならびに残留オーステナイトの焼戻しの冷却途中におけるマルテンサイト変態、この2つの原因に基く硬化によるものである。ただしこの場合、第二次硬化の主原因は特殊炭化物の析出によるもので、残留オーステナイトの変態によるものは第二義的なものとされている。⁸⁾⁴⁾⁷⁾⁸⁾⁹⁾

このような機構による第二次硬化の現象は18—4—1鋼のみならず、高C高V型の高速度鋼においてもほぼ同様であろうと考えられるが、この点について著者は本鋼の

(f) 焼戻し過程における炭化物の析出

(g) 残留オーステナイトとその焼戻しによる変態
この2つの問題について詳しい試験を行い、第二次硬化現象について検討を加えた。しかしここでは紙面の都合上その記述を割愛するが、結論のみ述べると本鋼の第二次硬化の主原因は特殊炭化物の析出によるもので、その機構は従来の高速度鋼の場合とほぼ同様に考えて差支えない。

なお第二次硬化をおこさせる炭化物について、高W型高速度鋼の場合にはそれは主として W_2C であることが K.Kuo⁴⁾ によつて報告されているが、高V型である本鋼においては著者の試験結果ならびに各特殊炭化物の硬さ等から考えて、 W_2C と V_4C_3 炭化物であることは間違いない。この場合、その主力とする炭化物は著者の合金鋼の耐焼戻し性に関する別の研究結果¹⁰⁾ から推察して、 V_4C_3 炭化であろうと考えている。

(g) 焼戻しによる析出炭化物の凝集

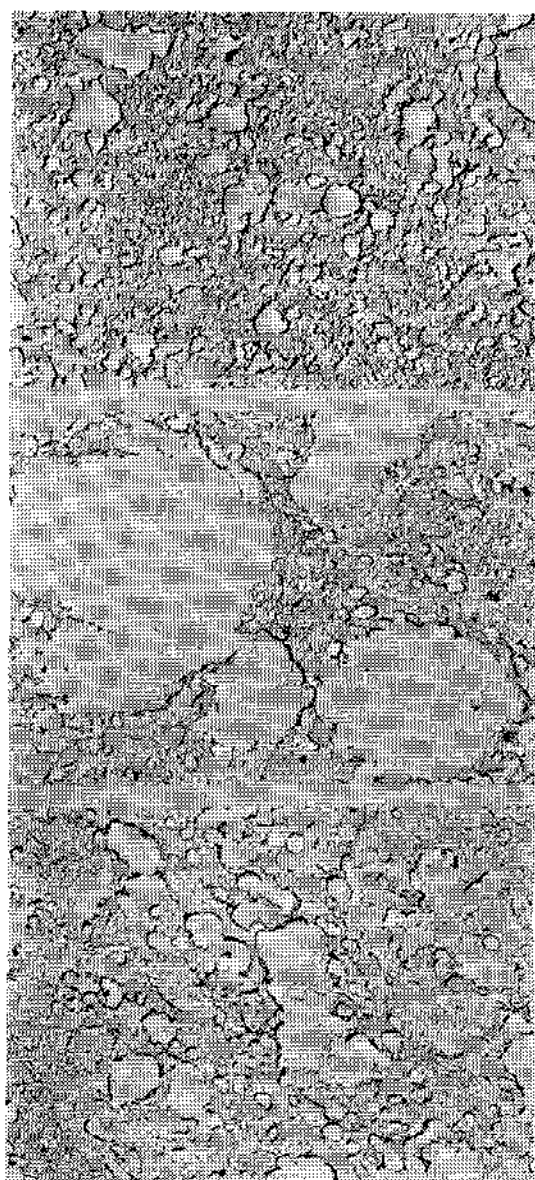
高速度鋼における炭化物はその焼戻し安定性ならびに高温硬度に関係する極めて重要なものである。それには焼戻しによつて析出した炭化物が高温において拡散凝集しがたいことが高速度切削工具鋼としての性能を高める上において重要な条件の一つとなるものと考えられる。

かかる観点から、著者は本鋼の焼戻しによる析出炭化物の成長および凝集の傾向を従来の高W型高速度鋼の場合と比較し、検討を加えた。すなわち焼入れした試料を種々の焼戻し温度にその保持時間を1—20hr. まで変えて焼戻しを行い、しかるのち各試料中の炭化物の分散状態を光学ならびに電子顕微鏡によつて観察した。結果を要約すると次の通りである。

まず炭化物の一般的な析出現象をみると、析出は最初に Grain boundary におこるいわゆる Localized precipitation が先行し、時間の経過とともに析出物が Matrix 中に at random に分散した General precipitation がおこる。そしてそれらの析出炭化物は焼戻し時間の増加あるいは焼戻し温度の上昇に伴つて次第に成長して球状化し、凝集する。しかして本鋼の焼戻しによつて析出する

炭化物は、高W型高速度鋼における析出炭化物に比べて成長および凝集の速度が極めて遅いことが確認された。

また一方、成長した析出炭化物は焼戻しが進むと未溶解炭化物に凝集する傾向を有するが、この傾向は高W型高速度鋼において強く、長時間焼戻し後の炭化物は極めて著しく凝集肥大する。しかるに本鋼においては、析出炭化物の成長速度が遅いとともに、それが未溶解炭化物へも凝集しがたく、したがつて長時間焼戻し後といえども本鋼における析出炭化物は Mean free path の極めて小さい分散状態を保持することがわかつた。その程度は Co の多量を含有する SKH 4 A 鋼といえども到底およびないほど強い。第7—9図はその一例として各種鋼の



第7図 高V高速度鋼の650°C×20h 焼戻し後の電子顕微鏡組織(焼入:1250°C×3'OQ)×10,000

第8図 SKH2鋼の650°C×20h 焼戻し後の電子顕微鏡組織(焼入:1270°C×3'OQ)×10,000

第9図 SKH 4 A鋼の650°C×20h 焼戻後の電子顕微鏡組織(焼入:1300°C×3'OQ)×10,000

650°C×20hr. 焼戻し試料の電子顕微鏡組織を示したものである。なお上記の結果は、本鋼のすぐれた特性の一つとして挙げ得られるものである。

このように高V型と高W型の高速度鋼とでは焼戻しによる析出炭化物の分散状態を著しく異にするが、これは換言すると V_4C_3 炭化物は W_2C (M_6C) 炭化物に比べて Coagulate しがたく、高温において極めて安定度が高いものであることを示すものである。この事実は著者のV鋼およびW鋼の焼戻し性に関する研究結果¹⁰⁾¹¹⁾においてさらに明確にしている。

なお析出硬化の理論あるいは分散型合金の強化理論は近年もつばら転位論的に考察されているが、本鋼が従来の高W型高速度鋼に比べて600°C以上の高温における焼戻軟化に対する抵抗性が大きいことも、この観点に立つて説明することができる。すなわち両鋼種間の析出炭化物の Dispersion の状態には大なる差異があり、高温焼戻しにおける炭化物の成長および凝集傾向は高W型に比べ本鋼の方が遙かに小さいからである。

(4) 特殊熱処理

特殊熱処理法として、サブゼロ処理、ベイナイト焼戻処理および窒化処理等について検討を加えた。その結果、本鋼は焼入れの際比較的多量のオーステナイトを残留するために、サブゼロ処理およびベイナイト焼戻処理の効果が大きい。また窒化物を作りやすいVを多量に含有するために窒化処理の効果もまた大きい。本報告においてはこれら処理の効果があることを記すに止め試験結果は省略する。

3-3 物理的性質

(1) 変態点

本鋼の Ac_1 — 3 , Ar_3 — 1 各変態点および焼入の際にあらわれる Ar'' 変態点 (一次 Ar'' 点) は、ともに高W型高速度鋼のそれに比べてやや低い。これは本鋼のC量が高いことに起因するためと考えられる。また焼戻しの際にあらわれる二次 Ar'' 変態点も高W型の場合に比べやや低目の傾向を示す。なお二次 Ar'' 変態を生ぜしめる最低焼戻温度は 550°C である。

(2) 比重

本鋼はW含有量が少いために比重が小さい。焼鈍材についての測定結果によれば、SKH 2 鋼の約 8.6 に対し、本鋼は約 8.0 である。

(3) 溶融温度

比重の場合と同様の理由により、本鋼の溶融温度は高W型高速度鋼に比べて低い。凝固時の熱分析試験によれば、SKH 2 鋼の凝固温度範囲は 1436~1432°C であるのに対し、本鋼は 1388~1382°C であり、前者に比べ約 50°C 低い。

(4) 熱伝導率

Despretz の方法¹²⁾ によつて本鋼の焼鈍状態における熱伝導率を高W型高速度鋼のそれと比較した。それによれば、本鋼はCoを含有する SKH 3 鋼と SKH 4 A 鋼とのほぼ中間の熱伝導率を有する。

また R. W. Powell 等¹³⁾ の用いた装置を参考にし、比較法によつて、本鋼ならびに高W型高速度鋼の焼戻過程における熱伝導率を測定した。結果を要約すると、一般に焼入状態ならびに低温度範囲の焼戻状態における熱伝導率はかなり小さいが、炭化物を析出しはじめる約 400~450°C の温度から熱伝導率は上昇し、約 550~600°C 附近で最高値を示す。また本鋼ならびに Co の多量を含有する SKH 4 A 鋼は、Co を含まない SKH 2 鋼に比べて、約 200~300°C 以下での熱伝導率はやや小さいが、第二次硬化をあらわす約 400°C 以上の温度になると各鋼種間の熱伝導率には大差がなくなり、最高焼戻硬度を示す 600°C 附近ではほぼ同等の値を示すようになる。(このときの熱伝導率は約 0.067 cal/cm.sec.°C、ただし定常状態になつてから約 1 時間後の値) したがつて焼戻しによる熱伝導率の上昇率は、SKH 2 鋼に比べて本鋼および SKH 4 A 鋼の方がやや大きい。

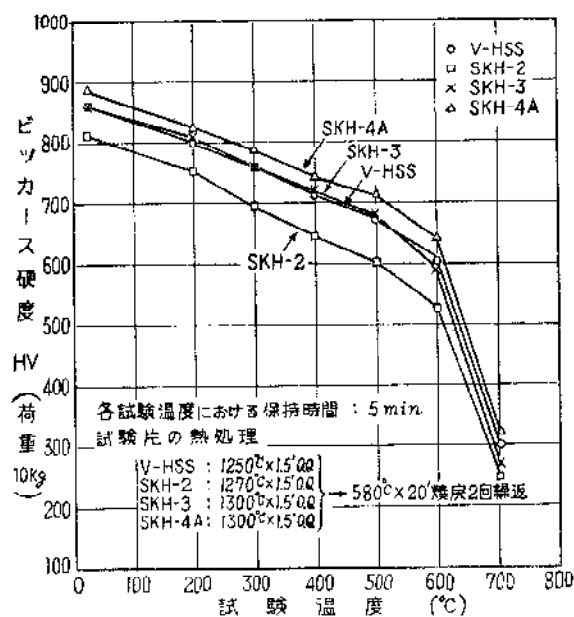
(5) 電気抵抗

本鋼および高W型高速度鋼のそれぞれ焼鈍、焼入れおよび焼戻し状態における電気抵抗を電位差計によつて測定し、各鋼種の比較を行つた。それによれば各熱処理状態とも、Co の多量を含有する SKH 4 A 鋼が最も比抵抗が大きく、本鋼と SKH 3 鋼とはほぼ同等の比抵抗を有する。なお熱処理状態による比抵抗の変化は熱伝導率の変化と対応するもので、各鋼種とも比抵抗は焼鈍状態において最も小さく、焼入れ状態ではマルテンサイトの生成による歪の内蔵とオーステナイトの残留によりかなり大きくなる。これを焼戻すと比抵抗は再び低下する。

(6) 高温硬度

高速度鋼は高温に焼戻しても軟化しないだけでは切削用に供するには不十分であつて、高温においてなお、分の高い硬度を保持することが不可欠の条件である。この点に関し、本鋼の高温における硬さを従来の高W型高速度鋼 (SKH 2, 3 および 4 A) と比較した結果を示すと第10図の通りである。なお試料は焼入れ焼戻しを施したものであるが、焼入温度は各鋼種のそれぞれ常用される範囲内をとり、本鋼は 1250°C、SKH 2 鋼は 1270°C、Co を含有する SKH 3 および SKH 4 A 鋼はともに 1300°C とし、いずれも 1.5 分保持後油冷した。焼戻しは各鋼種ともすべて 580°C に 20 分間これを 2 回繰返した。

さて同図に明らかなように、高速度鋼の高温における硬さは温度の上昇に伴つて次第に低下するが、600°C 以上では急激に減少する。この場合、高W型高速度鋼においては Co の含有量を増すほど高い硬度を保持する。



第10図 各種高速度鋼の高温硬度の比較
(AKASHI ビッカース硬度試験機による)

一方、本鋼の高温における硬さは、その焼入温度が比較的低いにもかかわらず、約600°CまではSKH 3鋼とほぼ等しく、それ以上の高温ではSKH 3とSKH 4A鋼との中間の硬さを示す。すなわち本鋼は含Co高速度鋼と同様に高温において高い硬度を保持する。

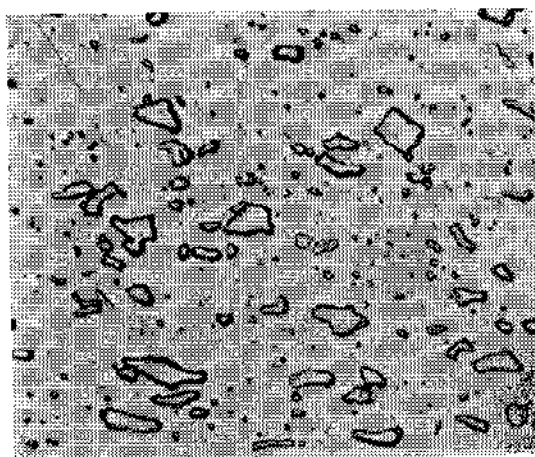
しかして本鋼の高温硬度の大なることは、すでに述べた焼戻軟化に対する抵抗性の大ききことと符号するが、この事実はVを主体とする特殊炭化物の析出によつておこつた硬度は高温において極めて安定度が高いことを示すものであり、さきに3-2節(3)のg項で述べた本鋼の焼戻しによつて析出する炭化物は高温において極めてCoagulateしがたいことと関連する事柄である。

(7) 炭化物の硬さおよび耐磨耗性

a) 炭化物の硬さ

高速度鋼は高温硬度が大なることの外に、高硬度を有する炭化物(未溶解炭化物)の存在がその切削能力を増さしめる上において是非必要な事柄である。この必須の条件に対して、本鋼に存在する炭化物は極めて硬いという大きな特徴を有する。例えば試料を研磨して炭化物を顕微鏡によつて観察する場合にそのことをよく知ることができる。すなわち、従来の高W型高速度鋼中に存在する炭化物はetchingを施すことによつて初めてよく観察されるのに対し、本鋼に存在する炭化物はno etchの状態においても浮彫りになって明瞭に観察することができる。したがって本鋼の研磨面は、etchingをしなくても、したと同様に鈍い色彩を呈する。第11図は焼入れした本鋼のno etchの状態における顕微鏡写真を示したものであるが、このように炭化物が浮彫りになって見えるのは、いうまでもなく炭化物が極めて硬いことに外なら

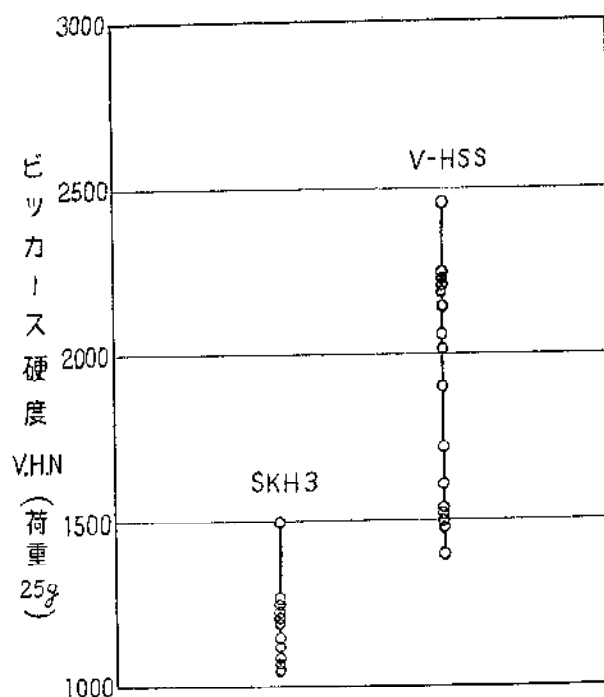
ない。



第11図 高V高速度鋼およびSKH 3鋼に存在する炭化物の硬度の比較

ところで炭化物の硬さについては2, 3の測定結果が報告されている。例えばL. P. Tarasov¹⁴⁾は高C高V高速度鋼中に含まれる炭化物は極めて硬く、それは酸化アルミニウムの研磨粉と同程度の硬さであると述べ、またP. Leckie-Ewing¹⁵⁾は高W型高速度鋼に含まれるM₆C炭化物はRC 73.5~77であるのに対し、高V高速度鋼に存在するMC炭化物は最も硬くRC 83.5~85に相当し、それは純WCの硬さよりもRC 1~2.5高いと報告している。さらに佐藤等¹⁶⁾によつても各種炭化物の硬さの比較がなされ、上と同様のことを報告している。

このように高V型高速度鋼中に存在する炭化物は極めて高硬度を有することが明らかにされているが、著者は



第12図 高V高速度鋼およびSKH 3鋼に存在する炭化物の硬度の比較

一応本研究による高V高速度鋼と高W型高速度鋼 (SKH 3) とに存在する炭化物 (未溶解炭化物) の硬さをビッカース微小硬度計の荷重 25gr. を用いて測定し、両者を比較した。第12図はこの結果を明示したもので、図中○印は測定値を示し、両鋼種の比較は棒グラフをもつてあらわした。すなわち、本鋼に存在する炭化物 (MC型) は、SKH 3 鋼に存在する炭化物 (M_6C 型) に比べて極めて硬いことがわかる。この測定結果において、本鋼中の炭化物の測定値にかなりのバラツキを生じたが、それぞれの平均値は、本鋼が V. H. N 約1900、SKH 3 は約1200である。

なお本試験における測定値は、さきに引用した P. Leckie-Ewing¹⁵⁾ および佐藤等¹⁶⁾ によつて報告された測定値に比べてかなり低い値を示したが、いずれにしてもMC炭化物は M_6C 炭化物に比べて高硬度を示すという点については変りない。

b) 耐 磨 耗 性

次に炭化物の硬さに関連する事柄として挙げなければならないことは、本鋼の被研削性 (Grindability) ならびに被機削性 (Machinability) が高W型高速度鋼より劣る、つまり研削あるいは機削しがたいということである。第3表はその一例を示すもので、本鋼と SKH 3 鋼との被研削性を、研磨砥石による研削量の差異から比較したものである。研削量は30秒間研削後の試料の重量減から求めたもので、同一条件で3回試験を行い、その平均値をとった。なお、同表の (試験1) および (試験2) は 使用砥石および研削条件をそれぞれ変えて試験を行つたものである。すなわちこの両試験結果からわかるように、両鋼種の研削量の比率は、SKH 3 鋼を1とす

第3表 高V高速度鋼とSKH3鋼との被研削性の比較

(試験1)

	V-HSS	SKH 3
研 削 前 重 量 (g)	63.390	61.953
30秒研削後重量 (g)	62.210	59.887
研 削 量 (g)	1.180	2.066
比	0.57	1

試 験 材 : $1/8$ " 角

研 削 機 械 : 単頭研磨盤 (3 HP)

使用砥石 : WA 60 L $18" \times 2" \times 10"$

研 削 条 件 : 回 転 数 1000 R. P. M.

研 削 速 度 1380m/min.

試片押付力 2.4kg

試 験 回 数 : 3回

(試験2)

	V-HSS	SKH 3
研 削 前 重 量 (g)	61.680	59.887
30秒研削後重量 (g)	60.982	58.742
研 削 量 (g)	0.698	1.145
比	0.61	1

試 験 材 : $1/8$ " 角

研 削 機 械 : 両頭研磨盤

使用砥石 : SA 46 K $10" \times 1" \times 1"$

研 削 条 件 : 回 転 数 1500 R. P. M.

研 削 速 度 1200m/min.

試片押付力 2.4kg

試 験 回 数 : 3回

れば、本鋼は約0.6であり、本鋼はおおよそ2倍弱研削しがたい。これは換言すると、同一研削量を得るためには本鋼は SKH 3 鋼の約2倍弱の時間を要するということである。なおこの試験において、研削時間を30秒の短時間としたのは、本鋼は極めて耐磨耗性が大きいために、やや長時間研削を続けると砥石が目づまりし、正確な結果を得ることができないからである。またこの試験は焼鈍材について行つたものであるが、焼入れ焼戻した状態においてもその研削状況は全く同じである。

以上のように、本鋼は従来の高W型高速度鋼に比べて研削および機削しがたいという欠点を有するのであるが、この理由は本鋼に存在する炭化物が非常に硬いことに起因する耐磨耗性の極めて大なることによるためである。したがつて上に述べた被研削性に関する試験結果は、これを換言すると本鋼と高W型高速度鋼との一種の耐磨耗性の比較試験結果と見做することができる。しかし高V高速度鋼における加工上のこの欠点は、反面において工具として使用する場合大なる耐磨耗性を与え、その切削能力を高める上に非常に大きな貢献をなすものである。

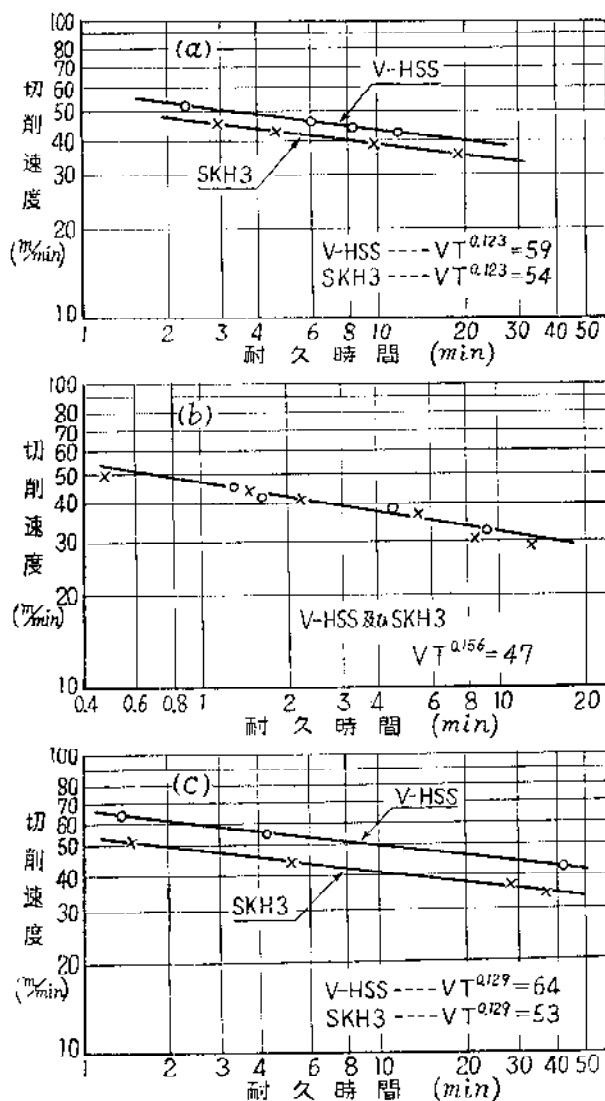
(8) 耐 酸 化 性

本鋼の高温における耐酸化性の良否を知るために、SKH 2, 3および4A 各高W型高速度鋼との耐酸化性の比較試験を行つた。結果を要約すると、高W型高速度鋼においてその耐酸化性はCo含有量にほぼ比例して向上するが、これと本鋼とを比べると、本鋼の耐酸化性はその加熱温度によつて多少異なるもCoを含有するSKH 3 鋼あるいはSKH 4 A 鋼とほぼ同等である。すなわち耐酸化性が大さい。なお本鋼の酸化被膜は青ずんだ鼠色を呈し、かつ緻密にして極めて密着性である。

3-4 総 括

本項においては、本研究による高V高速度鋼の物理冶金的諸性質についてその主要点を概括的に述べた。試験結果の示すように、本鋼は従来の高W型高速度鋼に勝る多くの特性を有するが、これを要約すると次の通りである。

本鋼は焼入れおよび焼戻しによつて得られる第二次硬度が高く、しかも析出炭化物が極めて成長および凝集しがたいために、高温における焼戻抵抗性が大きく、またそれと関連して高い高温硬度を保持し、さらにその地質に分布する極めて硬い未溶解炭化物の存在により大なる耐磨耗性を有するなど、高速度切削工具鋼としての必須の諸特性を具備するものである。



第13図 高V高速度鋼とSKH3鋼の切削速度と耐久寿命との関係

被削材：(a) 硬 鋼 (0.57C, 0.29Ni, 0.49Cr)
 (b) Ni-Cr鋼 (0.36C, 3.55Ni, 0.86Cr)
 (c) 寿 鉄
 送り：0.12mm/rev, 切込：1mm

4. 高V高速度鋼の切削試験成績

本研究による高V高速度鋼は現在種々の工具類として広く実用に供されており、その切削性試験の件数は各種実用試験によるものを含め相当数におよぶが、次にその一部を紹介する。なお切削試験において、本鋼に対する比較バイトは従来使用のJIS高速度鋼第2種 (SKH2), 第3種 (SKH3) および第4種甲 (SKH4A) などである。

(1) 剣バイトによる荒削り切削

第13図(a)~(c)に本鋼とSKH3 (市販完成品) との比較、第14図にSKH3およびSKH4Aとの比較試験結果を示す。また第4表-(A)欄に他の5件の試験例を示す。ただし例8はSKH4Aとの比較試験、他はSKH3との比較である。また例6, 7および8はいずれも実用試験によるものである。

(2) ヘールバイトによる仕上切削

本鋼ならびにSKH2, 3, 4A各高速度鋼製ヘールバイトを用いて6種類の材料を仕上げ切削したときの仕上面の精度 (粗度) を比較した。その結果、本鋼による仕上面の精度はSKH3よりも良くSKH4Aとはほぼ同程度であった。なお粗度の測定結果ならびに仕上面の拡大写真は紙面の都合上省略する。

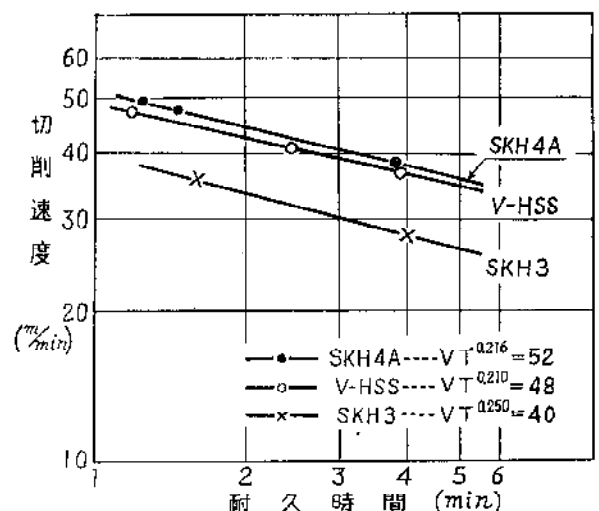
(3) フライスカッターによる切削

第4表-(B)欄にその2例を示す。ただし例1はSKH3との比較、例2はSKH2との比較試験結果である。

(4) 鉄道車輪の切削

a) 丸駒バイトによる荒削り切削……第5表-(C)欄にその4例を示す。いずれもSKH3との比較である。

b) 綫型バイトによる仕上切削……第5表-(D)



第14図 各種高速度鋼の切削速度と耐久寿命との関係
 被削材：FS4140, Mn-Cr-Mo鋼 $\sigma_B = 95\text{kg/mm}^2$
 送り：0.17mm/rev, 切込：4mm

第4表 高V高速度鋼の切削試験成績 (その1)

	例	鋼 種	被 削 材 料	切 削 条 件	耐久切削長さ又は 切 削 量	切削耐久時間	耐久比率	備 考
剣バイト (A)による荒 切削	3	V-HSS	SF 54 車軸	切削速度 48m/mn 送り 0.49mm/rev 切込 5mm	245mm	5'-31"	2.5	40° 真剣チップバイト 使用
		SKH 3	Dia. 160mm		110 "	2'-15"	1	
	4	V-HSS	SF 54 車軸	切削速度180m/mn 送り 0.2mm/rev 切込 0.5mm	—	13'-52"	1.6	19×25×170mm付刃 バイト使用 V-HSS刃先欠損せず SKH 3刃先欠損す
		SKH 3	Dia. 45mm		—	9'-00"	1	
	5	V-HSS	SF 54 車軸	切削速度 44m/mn 送り 0.49mm/rev 切込 5mm	1271mm	—	2.7	40° 真剣チップバイト 使用
		SKH 3	Dia. 148mm		470 "	—	1	
	6	V-HSS	SF55, 農産 2M クランクシャフト	切削速度 40m/mn 手動送り 切込 1~2mm	110本	—	2.2	切削面は黒皮鍛造まま
		SKH 3	ピン部端面切削, Hs33~35		50 "	—	1	
	7	V-HSS	STY80 リベット金型白用	切削速度 30m/mm 送り 0.2mm/rev 切込 0.5~2.0mm	17.0個	102'	2	19mm 角付刃バイト V-HSS 刃先欠損せず SKH3 刃先欠損切削不 能
		SKH 3	中軸 50×47×40mm		8.5 "	51'	1	
	8	V-HSS	S-45C (引抜材)	回転数 1500rpm 送り 0.068mm/rev 切込 2mm 切削油一種油	222個	—	1.3	5/8"×5/8"×5" ムクバイト。モナークスピ イマチック高速ターレット旋 盤使用。切削数は各 4 回の平 均値
		SKH 4 A	Je 伝導ボルト 長さ 40.5mm		174 "	—	1	
フライス (B)カッタに よる切削	1	V-HSS	高速度鋼第 3 種 (SKH3) 焼鈍材 175×25×1mm	回転数 235rpm 送り 21mm/mn 切込 2mm	883mm	—	1.2	D=75mm フライス
		SKH 3			758 "	—	1	
	2	V-HSS	SC 45 黒皮面切削	切削速度 39m/mn 送り 45mm/mn 切込 8mm 切削巾 75mm	—	118'	3.9	D=100mm フライス
		SKH 2			—	30'	1	

第5表 高V高速度鋼の切削試験成績 (その2)

	例	鋼 種	被 削 材 料	切 削 条 件	試験したバイトの数	総切削数	バイト1ヶ 当りの平均 切削数	耐久 比率	備 考
丸駒バイトによる (C)鉄道車輪 の荒切削	1	V-HSS	860φmm 客貨車従輪	切削速度 6.8m/mn. 送り 3.92mm/rev 切込 4mm	3ヶ	86輪	28.7輪	1.9	
		8			118	14.8	1		
	2	V-HSS	"	切削速度 6.8m/mn 送り 4.0mm/rev 切込 4.5mm	12	291	24.3	1.3	
		13			241	18.5	1		
	3	V-HSS	1250φmm 電気機関車動輪 (焼入タイヤ)	切削速度 4.7m/mn 送り 6mm/rev 切込 6mm	5	17	3.4	1.3	
		5			13	2.6	1		
	4	V-HSS	860φmm 客貨車従輪	回転数 1.6rev/mn 送り 4.0~8.2 mm/rev 切込 1~7mm	5	バイト1個1分当りの平均切削量 3693.5cm ³	1.6	切削量=送り×切込 ×π×タイヤ直径× 毎分回転数×切削時 間で寿命を測定	
		4			" 2264.7 "				1
線型バイトによる (D)鉄道車輪 の仕上切削	1	V-HSS	"	切削速度 6.8m/mn 切込 0.1~0.4mm	3	202	67.3	1.8	
		2			73	36.5	1		
	2	V-HSS	"	切削速度 8.5m/mn 切込 0.5~1.0mm	1	29	—	3.2	
		1			9	—	1		
	3	V-HSS	1250φmm 機関車動輪	切削速度 5.6~7.1 m/mn 切込 1mm	1	53	53	6	
		6			53	8.8	1		

欄にその3例を示す。いずれもSKH3との比較である。

(5) 切削性能の評価

上に本鋼の切削試験成績の一部を紹介したが、多くの使用実績からその性能をみるに、切削熱に対する耐久性ならびに耐磨耗性が極めて大きいために、刃先の擦傷衰損が少く、またよい切れ味を保持し、すぐれた性能を有している。すなわち、本鋼は18—4—1鋼であるSKH2を遙かに凌駕し、Coを含有するSKH3乃至SKH4Aに相当するが、その性能は切削内容により区分すると大体次のようである。

(a)重切削の場合……SKH3と同等乃至それ以上約3～6割良の性能を有する。

(b)軽切削の場合……SKH3の2～3倍、あるいはSKH4Aに匹敵する。

(c)仕上切削の場合……軽切削の場合と同様に、SKH3以上SKH4Aに相当する性能を有する。

このように、本研究による高V高速度鋼は従来の高速度鋼に比べて添加合金量の重量パーセントが少いにもかかわらず、Coを含有する高級高速度鋼と同等変るところがなく各種切削に良い成績を収めているが、特に軽切削ならびに仕上切削において高性能を発揮する。

5. 結 言

緒言で述べたように従来の高W型高速度鋼に代る強力なる切削工具鋼の製造は今日急務的な課題となっており、新しいタイプの高速度鋼に関心が払われている。その中で近年高C高V型高速度鋼が各国において注目され急速なる発達をなしつつあるが、われわれは他に先がけ独自の着想のもとに、すでに1952年本文で述べたようにW量をかなり節減し、しかもCoを全く含まず、V量を高めた適切なる合金元素の配合により、すぐれた諸性質と高性能を有し、かつ廉価なる高C高V高速度鋼を開発した。すなわち本鋼は、最小限の合金成分量にもかかわらず、従来の高W型高速度鋼にまさる多くの物理冶金的諸性質を具備し、その切削能力はCoを合金する高級高速度鋼に相当する。

本報告は以上の研究結果を一括取纏めたものであるが、紙面の都合上その大部分の図表を省略し、説明は概述するに止めた。

文 献

- 1) G. R. Brophy & R. H. Harrington ; Trans. Amer. Soc. Steel Treat., 19 (1931), 385
- 2) 大和久；工作機械（工具と材料篇），4（1941），402
- 3) H. J. Goldschmidt ; J. Iron & Steel Inst., 170 (1952), 189
- 4) K. Kuo ; J. Iron & Steel Inst., 174 (1953), 223
- 5) 佐藤，西沢，村井；鉄と鋼，45（1959），409
- 6) 小柴，木村，原田；鉄と鋼，44（1958），1186
- 7) 門間，樹村；日本金属学会誌，19（1955），65
- 8) 門間，樹村，阿部；鉄と鋼，42（1956），756
- 9) 佐藤，金子，西沢；日本金属学会誌，19（1955），385
- 10) 石塚；“鋼の耐焼戻性におよぼす特殊元素の影響”，日本製鋼所室蘭製作所，所内報告，第36—220号（1961）
- 11) 門間，石塚；鉄と鋼，47（1961），1532
- 12) 材料研究会編，工業材料便覧，（1944），223
- 13) R. W. PoWell & M. J. Hickman ; J. Iron & Steel Inst., 154（1946），112
- 14) L. P. Tarasov ; Metal Progress, 54（1948），846
- 15) P. Leckie-Ewing ; Trans. Amer. Soc. Metals, 44（1952），348
- 16) 佐藤，西沢，石原；日本金属学会誌，23（1959），403