研 究

WC-Co 超硬合金の高温変形挙動に及ぼす 炭化物粒度および合金炭素量の影響*

林 宏爾**, 並木 尚己***, 鈴木 寿**

Koji Hayashi, Naomi Namiki and Hisashi Suzuki: Effects of Carbide Grain Size and Carbon Content on High Temperature Deformation Behavior of WC-Co Cemented Carbide.

The high temperature deformation behavior of WC-(10~20)%Co cemented carbides was studied as a function of carbide grain size (1.6~6.5 μm) and carbon content by means of three-point bending tests at 873~1273 K.

It was found that, at a temperature as low as 873 K, the deformation was suppressed as carbide grain size and carbon content decreased; but, at 1273 K, it was inclined to be suppressed as grain size increased and carbon content decreased, with some exceptional cases. It was shown that the transverse-rupture strength at 1273 K reached a maximum at the grain size from 4 to 5 μm , the exact value being varied according to the carbon content. These results would be explained by considering the dynamic recovery of cemented carbides, which is a function of carbide grain size, carbon content, etc. (Received March 27, 1981)

I 緒 言

著者らは、すでに、WC-Co 超硬合金について、高温曲げ変形挙動と抗折力に及ぼす Co 量、結合相 (γ 相) 粒度ならびに WC 粒度の影響を調べている^{1~3)}。しかし、WC 粒度が著しく粗粒の場合と、炭素量が変化した場合の変形挙動については、なお検討の余地を残している。よって本研究では、主としてこの点を調べ、超硬合金の高温変形挙動ならびに抗折力に対する知見を深めようとした。

II 試料調製および実験方法

市販の粒度約 1.5~15 μm の WC および約 1.3 μm の Co 粉末を用い、ボール・ミル、成形の後、(1623~1673) K $\times$ 3.6 ks の真空焼結により、WC 粒度が約 1.6~6.5 μm の WC-(10~20)%Co 高炭素および低炭素 2 相合金 (γ 相の格子定数⁴⁾ は高炭素、低炭素合金でそれぞれ約 $3.554\times 10^{-1}\text{nm}$ 、および約 $3.566\times 10^{-1}\text{nm}$) を作った。焼結後の冷却速度は約 $3.3\times 10^{-1}\text{K/s}$ 一定とした。試料の γ 相粒度⁵⁾ は、Co 量が大なるほど、WC 粒度が小なるほど、また高炭素合金より低炭素合金の方が大となった (γ 相粒度は、WC 粒度による変化を考慮に入れると、10%Co 高炭素合金では 280~200 μm 、低炭素合金では 520~310 μm ; 20%Co 高炭素合金では 560~340 μm 、低炭素合金では 880~410 μm)。これらの試料を、既報⁶⁾

と同様に JIS 試片とした後、873~1273 K、真空中で 3 点曲げ試験に供し、破壊に至るまでの荷重-たわみ (P-d) 曲線および抗折力 (σ_m) を求め、主として合金の高温変形挙動と抗折力に及ぼす WC 粒度と炭素量の影響を調べた。

III 実験結果

はじめに、873 K における P-d 曲線の結果を Fig. 1 に示す。いずれの Co 量でも、炭素量一定の下では、微粒合金となるほど曲線の位置が全体的に高くなり、塑性変形しにくくなる。粒度一定下で炭素量の影響をみると、合金の Co 量によらず、低炭素合金の方が高炭素合金よりも塑性変形しにくくなる。

Fig. 2 には、より高温の 1273 K における P-d 曲線 (縦軸は Fig. 1 の 2.5 倍に拡大) を示す。各合金とも、873 K の場合よりも塑性変形 (この場合、高荷重下での塑性変形は、亀裂の発生、成長に基づく見かけの変形が含まれる⁷⁾) しやすくなるが、まず WC 粒度の影響については、Co 量、炭素量によらず、低荷重下での変形は、低温の場合と異なり、粗粒合金ほど起こりにくくなる。すなわち、粗粒合金ほど低荷重下での曲線の傾斜が大と

* 昭和56年3月27日受理

** 東京大学工学部金属材料学科, 〒113 東京都文京区本郷7-3-1

*** 富士ダイス株式会社, 〒146 東京都大田区下丸子2-17-10, 現在: 東京大学工学部研究生

Fig. 1 Effects of carbide grain size and carbon content on bending load-deflection (P-d) curves of WC-(10~20)%Co alloys. Tested at 873 K and at crosshead speed (CHS) of 8.3×10^{-6} m/s. Specimen size, $4.0 \times 8.0 \times 24$ mm³ (span, 20 mm).

なる。しかし、荷重が増加すると必ずしもそのようにならず、約 $3.8 \mu\text{m}$ 以上の粗粒合金では曲線の位置関係が逆転する場合（例えばCとD）を生じる。他方、炭素量の影響は、粗粒合金では低炭素合金の方が塑性変形しにくくなり、873 K の場合と同様の傾向を示すが、微粒合金ではそうでない。すなわち、低荷重下では高炭素合金の方が、高荷重下では低炭素合金の方が、それぞれ変形しにくくなる。

次に σ_m (P-d 曲線におけるPの最大値より求める¹⁾) の 873~1273 K における結果を Fig. 3 に示す。粒度の影響は、873 K においては、炭素量によらず粗粒合金ほど低強度となるが、1273 K では、炭素量によらず所定の粒度で最大強度がえられる。すなわち、高炭素合金では約 $4 \mu\text{m}$ 、低炭素合金ではより粗粒の $4 \sim 5 \mu\text{m}$ で最大強度がえられる。次に炭素量の影響は、WC 粒度一定の下で比べると、温度によらず、低炭素合金の方が常に高

強度となる。そして、低炭素合金と高炭素合金との強度差は、873 K においては粒度にほとんど依存しないが、1273 K では粒度に依存し、微粒側で著しく小さくなり粗粒側では大きくなる。

以上の結果を既報¹⁾の結果と比べると、873 K における粒度の影響は、著しく粗粒合金の場合でも、合金炭素量によらずほぼ既報¹⁾同様と見なされた。しかし、1273 K の場合、粗粒合金ほど変形しにくくなる事実は、低荷重下では認められたが、高荷重下では必ずしもそのようにならなかった。そしてその結果、 σ_m の最大値は炭素量にもよるが約 $4 \sim 5 \mu\text{m}$ でえられることが本研究で明らかになった。この結果によれば、例えばモルガン・ロール用超硬合金の粒度は、 $4 \sim 5 \mu\text{m}$ 程度とすることが望まれるであろう。

Fig. 4 は 10%Co 合金について、3点曲げクリープ試験³⁾を行なった結果例である ($\epsilon=1\%$ は 0.17 mm の d に対応)。クリープ歪速度 ($\dot{\epsilon}$) は、P-d 曲線において低荷重下で変形しにくい合金ほど小となり、破断までの時間は σ_m が大の合金ほど長くなった。すなわち、クリープ試験結果は曲げ試験結果とよく対応した。

IV 考 察

以上の結果のうち、873 K の結果は、微粒合金ほど γ 相が分散強化されている¹⁾とし、 γ 相はこの時低炭素合金ほど固溶強化の状態にある (γ 相中 W 固溶量は、この場合高炭素~低炭素合金で約 (3~4)~(7~8)%⁴⁾) と考えれば、ほぼ常識的な結果となる。1273 K で求めたクリープ試験の結果が曲げ試験の結果と対応したのもほぼ当然の結果であろう³⁾。そこで以下、1273 K での曲げ変形挙動と σ_m について簡単な考察を加えたい。

高温では γ 相中の転位が、変形中に回復消滅するが、その程度は粗粒合金ほど抑えられる¹⁾。したがって、低荷重下では、粗粒合金ほど塑性変形しにくくなったとしてよい。しかし、約 $3.8 \mu\text{m}$ 以上の粗粒合金では、荷重

Fig. 2 Effects of carbide grain size and carbon content on P-d curves of WC-(10~20)%Co alloys. Tested at 1273 K.

Fig. 3 Effects of carbide grain size and carbon content on transverse-rupture strength (σ_m) of WC-(10~20)%Co alloys. Tested at 873 K and 1273 K.

Fig. 4 Effect of carbide grain size and carbon content on creep curves of WC-10%Co alloys. Tested at 1273 K and at 0.3 GPa.

増加と共に粒度の小さい合金の方が曲線の位置が高くなった（曲線の位置関係が逆転）。これは、高荷重となるほど、増殖転位の数が増加し、その数は微粒合金ほど多くなるので、微粒合金では回復しやすいとしても結果的に微粒合金の方が転位密度が多くなり、低温の場合と同様に加工硬化度が大きくなったものと思われる。なお、この現象に対しては、微粒合金の方が γ 相粒度が大きかった（既述）ことも影響していると思われる⁹⁾。

次に、炭素量の影響を考察する（1273 K）。まず低荷重下での塑性変形について考える。粗粒合金では、873 Kの場合と同様、低炭素合金の方が塑性変形しにくくなったが、微粒合金ではその逆になった。ここで、前者の粗粒合金の結果は、粗粒合金では動的回復を起こしにくい

ので 873 K の場合と同様の理由（既述）に基づくと思われる。よって以下、後者の微粒合金の結果を検討した。高炭素および低炭素の 2 種の 10%Co 合金（試料 A, D）について、クロス・ヘッド速度 (CHS) を変化させた時の P-d 曲線を Fig. 5 に示す。これより、微粒合金は CHS が小的时候、2 本の A 曲線を比較すると分かるように、高炭素合金の方が加工硬化するが、CHS が大きになると、2 本の A' 曲線の比較から、低炭素合金ほど加工硬化することが分かる。この時粗粒合金は、CHS の大小によらず、常に低炭素合金の方が変形しにくくなっている。これらの結果は、動的回復を起こしやすい場合、すなわち CHS が小で微粒合金の場合に限って、高炭素合金の方が変形しにくくなることを示す。したがって上記の結果は、 γ 相中の W 固溶量の少ない高炭素合金の方が、W 固溶量の多い低炭素合金よりも、本質的に動的回復が抑えられる（加工硬化度が大きい）とすれば理解できるとも思われた。CHS が大の場合は回復しにくくなるので、低温の場合と同様低炭素合金の方が変形しにくくなる。

ところで、微粒合金については、低荷重下の場合と異なり高荷重下では高炭素合金の方が変形しやすくなった。この理由は、3.8 μm 以上の粗粒合金の場合に、高荷重下で P-d 曲線の位置関係が粒度によって逆転した理由とはほぼ同様と思われたが、詳細は検討の余地がある。

次に、1273 K における σ_m について考える。はじめに、高炭素合金と低炭素合金との σ_m 差について考えることにする。Fig. 3 によれば、粗粒合金に比べ微粒合金ではその差が著しく小となったが、これはすでに述べているように、微粒かつ低炭素合金ほど動的回復が起こりやすかったことに関係していると思われた。もしそうであれ

Fig. 5 Effects of CHS on P-d curves of WC-10%Co high and low carbon alloys having carbide grain size of 1.6 and 5.5 μm . Tested at 1273 K.

Fig. 6 Effects of CHS on σ_m of WC-10%Co high and low carbon alloys. Tested at 1273 K.

ば、動的回復がほとんど起こらないような大きな CHS の下では、1273 K の σ_m は 873 K の場合とほぼ同様の粒度および炭素量依存性を示すはずである。Fig. 6 は、Fig. 3 に示した 10%Co 合金の結果 (1273 K, 8.3×10^{-6} m/s) を参考にし、CHS を 8.3×10^{-6} m/s $\rightarrow$ 8.3×10^{-5} m/s と大にした場合の σ_m の結果を示したが、これによれば、微粒かつ低炭素合金ほど σ_m の上昇が大きくなり、上記の考えをよく裏づける。他方、Fig. 6 によると、CHS の大小に基づく強度差は、微粒かつ低炭素合金ほど大きくなっているが、これは当然のことである。したがって、 σ_m を最大とする粒度が、CHS が小さい場合、低炭素合金においてより粗粒側にずれることが理解できる。

V 総 括

WC-(10~20)%Co 超硬合金について、873~1273 K における高温曲げ変形挙動と抗折力に及ぼす WC 粒度 (1.6~6.5 μ m; 3.8 μ m 以上に注目) と合金炭素量の影響を、クロス・ヘッド速度 8.3×10^{-6} m/s の下で主として検討し、以下の結果をえた。

(1) 873 K では、微粒、低炭素合金ほど常に塑性変形が抑えられ、強度も大となった。これは、そのような合金ほどそれぞれ分散強化、固溶強化されるためと考えられた。

(2) 1273 K の高温では、粗粒合金となるほど低荷重下での塑性変形が抑えられたが、荷重が増加すると 3.8 μ m 以上の合金では、粗粒合金となるほど逆に変形しやすくなった。これらは、加工硬化度と動的回復量などの粒度依存性から説明できた。炭素量の影響については、粗粒合金では 873 K の場合と同様、常に低炭素合金の方が塑性変形が抑えられたが、微粒合金では低荷重下においては、逆に高炭素合金の方が抑えられた。これは、結合相中の W 固溶量の多い低炭素合金の方が、本質的に動的回復を起こしやすく、この影響が、動的回復量の多い微粒合金で顕著に現われたことによると考えられた。

文 献

- 1) 鈴木, 林, 谷口, 松原: 日本金属学会誌, **44** (1980), 1210.
- 2) 張, 靳, 松原, 鈴木: 鋼鉄 (中国誌), **15** (1980), 29.
- 3) 鈴木, 林, 李: 粉体および粉末冶金, **27** (1980), 229.
- 4) 鈴木, 梶山, 梅田: 日本金属学会誌, **28** (1964), 287.

ニュース

国際会議開催のご案内

① 日時, ② 場所, ③ 申込先, 連絡先
'Productivity and Powder Metallurgy' Conference

- ① February 9-11, 1982
- ② Frankfurt Intercontinental Hotel
(Frankfurt, West Germany)
- ③ Conference Organizer-'Productivity and Powder Metallurgy'
Metal Powder Report
18/19 Talbot Changers
Shrewsbury, Shropshire
England, SY1 1LG

Fine Particle Society "13th Annual Meeting, Spring 1982"

- ① April 12-14, 1982
- ② Black stone Hotel (Chicago, Illinois)
- ③ Dr. Teoman Ariman
Associate Dean
College of Engineering & Physical Sciences
The University of Tulsa
Tulsa, Oklahoma 74104
(Phone: 918/592-6000 ext. 2575)

The 9th International Powder and Bulk Solids Technology Exhibition and Conference

- ① March 8-11, 1983
- ② National Exhibition Centre
(Birmingham, England)
- ③ Specialist exhibitions Ltd.
Green Dragon House, 64-70 High Street
Croydon Surrey
CR9 2UH, England