WC-Co 超硬合金のワイヤーカット放電加工による 機械的性質の劣化

蒲 地 一 嘉* 伊 藤 亨*
山 本 勉** 中 村 誠 治**

J.Japan Inst. Metals, Vol.52, No.6(1988), pp.581-587

Deterioration of Mechanical Properties of WC-Co Cemented Carbides by Discharge Spark Erosion Method

Kazuyoshi Kamachi*, Toru Ito*, Tsutomu Yamamoto**
and Seiji Nakamura**

The discharge spark erosion method using fine wire is widely applied to cut the cemented carbides. When the cemented carbides are machined by the method, the deterioration of the mechanical properties have been observed as failure accidents or scattering of the tools life, but a little systematic studies have been reported. In this work, the deterioration of the mechanical properties of the cemented carbides when they were cut by the method were studied.

The cemented carbides of WC-(5.5~20)mass%Co alloys were machined by the discharge spark erosion method and the machined surface were examined by X-ray diffraction to identify the formed phases by the thermal effects of the discharge spark, and the residual stresses were measured by the X-ray stress measuring method as well as microscopic observation by SEM.

These results of the experiments were compared with the transverse rupture strength of the cut specimens.

From the results of the experiments, it has been made clear that the causes of the deterioration of the mechanical properties of the cemented carbides cut by the discharge spark erosion method would be based on three factors: (1) the formation of brittle phases of eta carbides owing to shortage of carbon by a thermal effect of discharge spark erosion: (2) the microcrack formation on the cut surface: and (3) the residual stress of tension produced on the cut surface due to the thermal effect. These factors are inevitable under high temperature processing of the discharge spark erosion method, but they can be eliminated by annealing above 1373 K by the annihilation of eta carbides and by stress relief of tension. To eliminate the microcracks, it is required to grind the cut surface for a proper depth corresponding to the depth of the microcracks, depending on the machining conditions and the compositions of the cemented carbides.

(Received September 3, 1987)

Keywords: cemented carbides, discharge spark erosion cutting, residual stress, transverse rupture strength, eta carbides, microcrack

I. 緒 言

超硬特性を有する WC-Co 合金工具の切断あるいは成型加工等にワイヤーカット放電加工が重用され広く用いられているが、工具の寿命にバラツキがあったり破損事故が生じたりすることから、放電加工面の機械的性質の劣化が問題になっている。この原因は、放電加工のために起こる局部的過熱によって微小き裂が発生すること、加工変質相

の生成によるものなどであらうと考えられているが⁽¹⁾⁻⁽³⁾、系統的な研究は少ないようである。このような機械的性質の劣化について研究するため、結合相 Co 量の異なった WC-Co 合金のワイヤーカット面について X 線の観察を行うと共に残留応力の測定を実施して若干の知見を得た。これら研究の結果、ワイヤーカット放電加工面近傍には、加工による熱影響のためイーター炭化物が生成すると共に微小き裂の発生が見られ、さらに引張り残留応力が測定されるこ

* 近畿大学理工学部(Faculty of Science and Technology, Kinki University, Higashiosaka)

** ダイジェット工業(Dijet Industrial Co. Ltd., Osaka)

とが明らかとなった。これらの諸因子が重畳して機械的性質の劣化の原因であろうと結論した。

さらに劣化した機械的性質を回復させるため、熱処理を施しあるいはワイヤーカット加工面の研削除去を施した場合についても同様の観察を行い、それらの条件について検討した。

II. 実験方法

ワイヤーカット放電加工試験の供試材は WC-(5.5~20) mass% Co 超硬合金であって、内部欠陥の影響を除くため HIP 処理を施し、(4 mm×8.3 mm×25 mm)の寸法に製作した。三菱放電加工機 DWC-90N によってこの試験片をワイヤーカット切断して、(4 mm×8 mm×25 mm)の抗折力試験片に仕上げた。このワイヤーカット加工面について X 線観察を行った後、加工面が凸側(引張り側)になるようにして 3 点曲げ試験を行い抗折力を測定した。

ワイヤーカット切断加工条件は、Table 1 に示す。表中、Offset は粗加工面からの距離を示す。カットワイヤーは黄銅であり $\phi 0.2$ mm の細線であって、冷却は主に水を用いた。粗加工切断は 13.0 $\mu\text{m/s}$ の速度により、オフセット量の異なった仕上げ切断加工を 4 回行った。粗加工面には Cu が若干蒸着しているようであって黄褐色を呈したが、仕上げ加工面には Cu は見られなかった。真空熱処理は、ワイヤーカット後の試験片を 1073~1373 K で 3.6 ks 実施し、またワイヤーカット加工面から約 15 μm 研削除去した試験片を用意して X 線回折、残留応力測定、SEM による観察および XMA 分析を行った。

Table 1 Machining conditions of wire spark erosion.

	Rough machining	Fine machining			
		10	5	3	2
Offset (μm)	—	10	5	3	2
Condensor capacity (μF)	1.2	0.05	0.05	0.05	0.05
Machining speed ($\mu\text{m/s}$)	13.0	67.0	67.0	67.0	67.0
Wire speed (mm/s)	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0
Wire tension (N)	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78

III. 実験結果

ワイヤーカットした WC-Co 超硬合金の抗折強度試験の結果を Fig. 1 に示す。Fig. 1 の横軸には結合相 Co 量を取り、縦軸は抗折力であって、研削状態の試験片についての値と粗加工および仕上げ加工の状態についての値を比較すると共に、再焼結処理についての測定値も併載してある。Fig. 2 に示すのは仕上げ加工した試験片について X 線的に測定した残留応力の測定値を研削のままの状態および再焼結処理した状態の試験片について測定した応力値と比較

Fig. 1 Effect of binder contents on transverse rupture strength of WC-(5.5~20) mass% Co alloys. (a) as ground state, (b) fine cut state, (c) rough cut state and (d) resintered state.

Fig. 2 Effect of binder contents on residual stress of WC-(5.5~20) mass% Co alloys. (a) Fine cut surface, (b) Resintered surface and (c) As ground surface.

した結果である。

抗折力は研削したままの状態がもっとも高い値を示しワイヤーカットによって著しい強度低下を示す⁽⁴⁾⁽⁵⁾。仕上げ加工面より粗加工面の強度低下がやや大きい。再焼結処理によって抗折力はかなり回復して研削状態に近づく。

残留応力は研削状態ではすべて圧縮応力であるのに対して、ワイヤーカット状態ではすべて引張り応力に変化している。放電加工であるから機械的歪みが生ずることは無いと考えられ、この応力変化は放電のための熱影響によるものであることは疑いない。この間の相の変化について考察するために撮った X 線回折図形を Fig. 3 に示す。Fig. 3 (b) は粗加工面についての回折図形であって WC 相の回折線は回折強度が低く、 W_2C の回折線が顕著である外、Cu

Fig.3 X-ray diffraction patterns of wire cut surface of WC-12%Co alloys. (a) is rough cut and (b) is fine cut.

Fig.4 X-ray diffraction pattern, measured from wire cut WC-15%Co alloy, after elimination of 20 μm by electropolishing from the cut surface.

(111)が現れている。仕上げ加工面について見ると WC の回折線強度が高くなり $\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$ および $\text{Co}_x\text{W}_y\text{C}_z$ 化合物† の回折線が顕著である ((c) は比較のために、研削のままの状態の回折図形を示す)。これ等の W_2C 相およびイーター相が形成することは状態図から推定して熱影響によって表面付近に脱炭が起り W_2C およびイーター相が WC と共存する状態で急冷されたものと考えられる。 $\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$, $\text{Co}_6\text{W}_6\text{C}$

W_6C は明確な相として報告されているが、 $\text{Co}_x\text{W}_y\text{C}_z$ についてはこの回折線に該当する炭化物相の報告はない。しかし成分としては W, Co と C 以外には無くまた XMA による定性分析結果から推定して $\text{Co}_x\text{W}_y\text{C}_z$ としたものである。

電解研磨によって表面層を除去して行くと約 60 μm に達する深さでこれ等の炭化物の回折線は消失するが、この間、化学量論的に異なった相が薄層をなして形成されているようである。深さと生成相の関係については現在研究中であり、詳細についてはまだ明らかではないが微細な結晶が生成しているようであり、X 線回折図形上 Fig.4 に示すような非晶質の存在を現すバックグラウンドの異常が認められる。Fig.4 において、 M_6 は $\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$ を、 M_{12} は $\text{Co}_6\text{W}_6\text{C}$ をそれぞれ示すが M_x は先に述べたと同様、構造的に未定の結晶相である。

Fig.5 に示すのは、WC-12%Co 合金の抗折力測定試験片の破面の SEM 写真と XMA による面分析の結果であり、表面より 3~4 μm の幅で W と Co より成る変質相が見られる。粗加工試料の場合、その表面には Fig.6 に示すようにカットワイヤーが蒸着した Cu 層が付着している事が分析される。X 線的にも Cu の回折線が認められることは Fig.3 に示した通りであり、5~6 μm の厚さに及んでいる。

† $\text{Co}_x\text{W}_y\text{C}_z$ の化合物については JCPDS カードに記載はない。しかし、Co, W, および C の 3 元化合物、イーター相として報告されている炭化物は、次に示すように多くあり、ここでは、Co, W, C, の 3 成分と考え、XMA の定性分析結果から、明らかに回折線として認められしかも格子常数が異なったものを $\text{Co}_x\text{W}_y\text{C}_z$ と記した。 ($\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$)_{112F} No.27-1125; ($\text{Co}_6\text{W}_6\text{C}$)_F No.22-597; ($\text{Co}_6\text{W}_6\text{C}$)_{104F} No.23-939; ($\text{Co}_2\text{W}_4\text{C}$)_{112F} No.6-611; ($\text{Co}_3\text{W}_5\text{C}_4$)_{32H} No.6-616.

Fig.5 Scanning electron micro-photograph and characteristic X-ray images of fine cut WC-12%Co alloy, near the wire cut surface.

Fig.6 Scanning electron micro-photograph and characteristic X-ray images of rough cut WC-12%Co alloy on fractured surface near the wire cut surface.

Fig.7 に示す写真は WC-5.5%Co 合金のワイヤーカット試料断面での加工面近傍の SEM 像であり、微小き裂が発生しておりその深さは約15 μm である。15%Co 以上の合金ではこれ等微小き裂はあまり多くは認められない。この点については、ワイヤーカット面について観察した SEM 像 Fig.8 においても同様に、5.5%Co 合金の場合多くの微小き裂が認められ、また 12%Co 合金においては微小き裂が認められるが 20%Co 合金では、極めて僅かしか認められないことが分かる。この外、気泡と考えられるほぼ円形

Fig.7 Micro-structure of cross section of WC-5.5%Co alloy, showing microcracks formation by wire spark erosion.

の窪みが発生している。Fig.1 に示した抗折力試験の結果においてワイヤーカットによる合金強度の低下率は Co 量の少ない方が大きい。これは以上述べた微小き裂の影響と考えられる。気泡は冷却剤の熱分解による気体によるものと考えられる。

イーター炭化物は構造的に複雑な結晶相であり、脆い相であり機械的性質劣化の一因である。

以上の結果から機械的性質の低下はワイヤーカット放電加工による熱影響が原因であり、そのため数種のイーター炭化物が生成する事、微小き裂が発生する事および引張りの応力が残留する事の三つの因子が生起することによるものと考えられる。

このように劣化した機械的強度を回復させるため、三つの劣化の因子を除去する方法として考えられる事は、イーター相の消去と、残留応力除去の為の熱処理および微小表面き裂削除の為の研削である。まずワイヤーカットした試

Fig.8 Micro-structures of wire cut surface of WC-(5.5%, 12% & 20%)Co alloys.

験片を真空中において 1073~1473 K で、3.6 ks 熱処理した。この熱処理によって、イーター相が変化し、消失するがその熱処理温度における X 線回折図形を Fig.9 に示す。すなわち、ワイヤーカットしたままでは、 $\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$ 、 $\text{Co}_x\text{W}_y\text{C}_z$ 等のイーター炭化物相の回折線が顕著に見られるが、1073 K における焼鈍によってこれらの相は、 $\text{Co}_2\text{W}_4\text{C}$ 、 $\text{Co}_6\text{W}_6\text{C}$ 等の相に変化し、以後焼鈍温度の上昇に伴ってそれ等の回折線強度は減少する。1373 K 以上の温度で

Fig.9 X-ray diffraction patterns of the effects of annealing temperature of wire cut WC-12%Co alloys.

の焼鈍によってこれらイーター炭化物相の回折線はすべて消失して、WC 相と Co 相の回折線のみとなり、放電加工以前の状態に復する。これは、合金内部よりの C の拡散再分配によって、

等の反応が起ったためと推定される。同時に残留応力は Fig.10 に示すように圧縮応力に変化して加工以前の状態と同様になる。しかし表面の微小き裂はこの焼鈍によって消失しなかった。そこで加工面より約 15 μm 研削除去して抗折力強度を試験した。これらの結果を Fig.11 に示す。Fig.11 は焼鈍によるイーター相消失の効果と約 15 μm 研削除去した効果を示す抗折力試験結果である。この図から明らかなように、研削によって機械的強度は高くなり加工以前の状態に近づいているが、Co 量の低い 5.5%Co 合金ではその機械的強度の回復は十分でない。SEM 像 Fig.12 より考えて、15 μm 研削除去後もなお微小き裂は残存しており、低 Co 合金の場合には 15 μm の研削除去では、微小き裂を完全に除去することは困難であって、もう少し深く研削除去する必要があると考えられる。焼鈍によって残留応力が圧縮になった試験片に、ビッカース硬度測定の際の圧痕を押し、圧痕周辺のき裂を観察し、さらに 1373 K で焼鈍して同様に観察した所、Fig.13 に示すようにき

Fig.10 Residual stresses of wire cut WC-(5.5~20)%Co alloys, on their wire cut surface and that of after annealing at 1373 K for 3.6 ks.

Fig.11 Transverse rupture strength of wire cut WC-(5.5~20)%Co alloys, annealed at 1373 K for 3.6 ks and eliminated about 15 μm of cut surface by electric polishing.

Fig.12 Micro-structure of wire cut WC-5.5%Co alloy after elimination of about 15 μm .

裂は癒着する傾向にあると考えられ、き裂先端は鈍化し短くなっている。すなわち 15 μm の研削除去では低 Co 合金の場合、き裂が完全に消滅していないのであって、完全に微小き裂を除去するための研削深さは材種に応じて決定すべき事である。

IV. 考 察

以上述べた実験の結果の中で機械的性質の劣化の原因は放電加工の熱影響にある事は明らかである。カットワイヤー近傍は、融点より高い温度に接し液相が生じ、そして急冷されるため温度勾配は極めて急峻となる。酸化等のためと思われる脱炭が起こるが、この急峻な温度勾配のため加工面近傍では、それぞれの温度によって形成される諸相が相接して形成され室温に至り、イーター相および W_2C 相が共存した状態となる (Fig.3)。合金の炭素量が減少すれば合金密度が増大し、したがって体積の収縮が起こることは鈴木⁽⁶⁾などによって研究されており、また Pollock と Stadelmann⁽⁷⁾ によれば Co-W-C 3 元合金において、WC、 W_2C と平衡共存してイーター炭化物相が形成される場合、共存する相の組合せによってそれぞれの相の結晶の格子常数が変化する事が報告されている。このような研究結果を併せ考えると、体積減少のため、引張り応力が残存し、さらに微小き裂が生成する事は当然である。引張り応力が測定される点については、TiN を CVD 被覆した場合、処理温度が高いためイーター相が形成され引張り応力が発生するのであり、PVD 被覆の場合には処理温度が低いため C の拡散が起り難く、したがってイーター相は生成されず、また応力も圧縮応力であると言う以前の実験結果⁽⁸⁾とも一致した結果である。

Before annealing

After annealing

Fig.13 Scanning electron micro-photographs around the tip of microcracks of WC-12%Co alloy, induced by Vickers indentation, before and after annealing at 1373 K for 3.6 ks.

V. 結 論

WC-Co 超硬合金の切断加工あるいは成型加工にワイヤーカット法が用いられているが、ワイヤーカット放電加工した場合、放電加工面における機械的性質の劣化が議論される場所である。この機械的性質の劣化の原因は、放電加工の熱影響のために、加工面およびその近傍における脱炭によってイーター相が形成されること、微小き裂が発生することなどによるものと考えられているが、系統的研究は少ないようである。これらの諸点について、Co 量を 5.5% から 20% の間に変化させた WC-Co 超硬合金試料について研究した結果、イーター相が生成していることを X 線的に確認した。また、切断面および断面の SEM 観察によって微小き裂が発生していることも確認した。

さらに、残留応力を X 線的に測定し、引張り残留応力が存在することが明らかとなったが、引張り残留応力はき裂の発生、特にき裂の伝播を助長する重要な因子と考えられる。これらの因子の中、加工面に生じた微小き裂は研削除去しなければならないが、実験したワイヤーカットの条件では 15 μm の研削では不十分であった。Co 量、加工条件等から考慮して研削深さを決めるべきであると考えられ、

イーター相については 1373 K 以上の温度で焼鈍すれば炭素の再配分によってイーター相の消去ができると同時に応力は除去される。

文 献

- (1) K. Masui and T. Tamimura: *Machinability of Cemented Carbides with Wire Spark Erosion*, Paper on The C.I.R.P., Sept., (1978) 1~5; 増井清徳, 金田 昇: 昭和 54 年, 精機学会春期大会講演前刷, (1979), 111.
- (2) C.J. Heuvelmann: Summary Rep. on The C. I.R.P., Vol. 29, No. 2 (1980), 541.
- (3) 増井清徳: 日本塑性学会冷間鍛造部会資料, No. 56-20 (1982).
- (4) P. Rautala and J.T. Norton: *J. Met.*, 4 (1952), 1045.
- (5) P. Schwarzkopf and R. Kieffer: *Cemented Carbides*, The Macmillan Co. (N.Y.), (1960), 78.
- (6) 鈴木 寿, 梶山正孝, 梅田高照: 日本金属学会誌, 28 (1964), 55.
- (7) C. B. Pollock and H. H. Stadelmann: *Metall. Trans.*, 1 (1970), 765.
- (8) 山本 勉, 蒲地一嘉: 日本金属学会誌, 49 (1985), 120; 50 (1986), 320.