WC-Co 超硬合金の曲げ破壊強度に及ぼす砥粒流動加工の影響*

三木 一隆^{*1}, 山崎 隆夫^{*1}, 川久保 英樹^{*1}
中澤 清^{*2}, 牛立 斌^{*3}, 小林 光征^{*3}Effect of Abrasive Flow Machining Process on Bending Fracture Strength
of WC-Co AlloyKazutaka MIKI^{*4}, Takao YAMAZAKI, Hideki KAWAKUBO
Kiyoshi NAKAZAWA, Libin NIU, Mitsuyuki KOBAYASHI^{*4} Nagano Prefectural Institute of Technology, Dept. of Production Technology,
Shimonogou 813-8, Ueda-shi Nagano, 386-1211 Japan

The bending fracture strength of a commercial WC-Co alloy finished by abrasive flow machining process was examined by three points bending test, using two kinds of specimens pre-processed by wire-EDM and grinding. It was found that this abrasive flow machining process increased the bending fracture strength of wire-EDM pre-processed specimens by 60% and of grinding pre-processed ones by 10% at maximum, respectively. This big strength increase of wire-EDM pre-processed specimens was ascribed to the facts that the abrasive flow machining process changed the surface tensile residual stress to the compressive one and removed micro cracks existed in surface layer. Further the relative small strength increase in grinding pre-processed specimens was discussed on the basis of improvement in surface roughness and decrease in the amount of surface residual stress of compression side, caused by abrasive flow machining process. Finally it was concluded that the abrasive flow machining process is the effective finishing process for a WC-Co alloy with both effects of increasing the strength and giving the enough surface property.

Key Words: Abrasive Grain, Wire-EDM, Grinding, Residual Stress, WC-Co Alloy, Abrasive Flow Machining Process, Bending Fracture Strength

1. まえがき

WC-Co超硬合金は、近年高精度電子部品を中心とした精密プレス金型に広く使用され、金型の長寿命化に大きく寄与している。これは、超硬合金が高硬度で優れた耐磨耗性を有していることによるが、それに加えWCの微粒化やHIP処理による組成の安定化が図られ、耐衝撃性や抗折強度が向上した結果である。

超硬合金金型の形状創成加工は、その特性による被加工性の悪さから、もっぱら放電加工と研削加工により行われている。放電加工は研削加工に比べ加工能率がよく、最近では加工表面性状の研究^{(1)~(3)}や加工方式の改良がなされ、数 μmRy 程度の表面粗さに仕上げるができるようになってきたが、精密金型においては表面性状の改善を後工程で行う必要がある。

砥粒流動加工はデバーリングや加工表面性状の改善を目的に、特に管などの内面の加工に有効な手段として用いられてきた⁽⁴⁾。最近では、金型の磨き仕上げ作業を合理化する目的から、この加工法を金型表面研磨工程に使用する例⁽⁵⁾が増え、超硬合金金型への適用も図られているが、砥粒流動加工の強度への影響は明らかではない。

そこで本研究は、市販の超微粒子タイプWC-Co超硬合金のワイヤカット放電加工面や研削面に砥粒流動加工を行い、それが曲げ破壊強度に及ぼす影響について表面性状と合わせ検討を行ったので報告する。

2. 実験方法

2.1 供試材と試験片 供試材に用いたWC-Co超硬合金は、精密金型材料として市販されている超微粒子タイプのものである。その物性を表1に示す。試験片は表面をワイヤカット放電加工(以後WEDとよぶ)したものと研削加工を行ったものの2種類(各25個)

* 原稿受付 1999年11月19日。

^{*1} 正員, 長野県工科短期大学校 (☎ 386-1211 上田市下之郷 813-8)。^{*2} 新光電気工業(株) (☎ 383-8581 中野市草間 1216-9)。^{*3} 正員, 信州大学工学部 (☎ 380-0928 長野市若里 4-17-1)。

E-mail: miki@pit-nagano.ac.jp

を用意した．図1にそれぞれの試験片の寸法と加工方向および表面粗さを示す．図2はこの試験片表面のSEM写真で紙面の上下方向が試験片の長手方向になっている．(a)はWED試験片で表面に放電加工によるクラックが観察される．また(b)の研削加工試験片では表面長手方向に研削の条痕がはっきりと現れている．これらの試験片を以後簡単のためそれぞれWED材、研削材と呼ぶことにする．

2.2 研磨加工条件 この2種の試験片の前加工面に、表2に示す研磨方法（時間と方向）を設定して砥粒流動加工を施した．砥粒流動加工は、(株)東洋エクスツールドホーン製EX800型専用機で行った．この加工は砥粒を半固体状の粘弾性媒体に混練し（これをメディアとよぶ）、これを研磨工具として加工部に押し込み、油圧力で機械的に移動させることにより研磨加工を行っている⁽⁶⁾．この物体は主に高分子系の合成樹脂と合成グリースでできており、それ自体の結合力

や粘着力は強いが、金属面への付着、固着がほとんどないため、加工面とメディアとの相対運動が発生しやすい．また研磨圧力はメディアの弾性力による圧縮効果で得られ、これにより砥粒が加工面に圧接され研磨を行うことができる．研磨量は被加工面への研磨圧力と相対運動量に依存するが、この加工法においては研磨圧力と研磨速度を適切に得るため、メディアの硬さ、押し込み圧およびメディアの通過断面積の設定が重要になる．これらの加工条件は、加工面を通過するメディアの流れが層流になることを加工に先立って観察し決定される．本実験におけるメディアの硬さは、金型の面研磨に一般的に実用されているタイプを選定した．その加工条件を表3に示す．

2.3 曲げ試験方法 超硬合金は一般的な金属材料にくらべ破壊までの弾性ひずみ、塑性ひずみとも著しく小さく破壊強度は高い．その強さは曲げ破壊試験の結果により抗折力として評価される⁽⁷⁾ので、本研究では2.1節に示す砥粒流動加工を施した試験片に対して3点曲げ試験を行った．

曲げ試験はインストロン型引張試験機（島津オートグラフAG-10TD）に支点スパン20mmの3点曲げ試験治具を取り付け、砥粒流動加工面を下にして試験片をセットし、クロスヘッド速度を0.5mm/minに設定して行った．曲げ破壊強度は、JIS B 4053に規定されている算出式を用いて破壊荷重より求めた．

2.4 表面残留応力測定 加工表面の残留応力測定はX線回折法により行い、 $2\theta - \sin^2\psi$ 線図⁽⁸⁾を用いて算出した．使用した測定装置は、理学電機(株)MSF-2Mである．表面残留応力はWC相とCo相で異なった測

Table 1 Physical properties of material used

Mean grain size of WC	μm	0.6
Binder phase percentage(Co)	wt. %	10
Specific gravity		14.37
Hardness	HRA	92.9
Young's modulus	MPa	5.8×10^5

Fig.1 Geometry of specimen and its machining data

Fig.2 SEM micrographs of specimen surfaces

Table 2 Direction and time of abrasive flow machining

Pre-process	Machining direction on piece surface	Machining time min.	
WED	Longitudinal	10	30
	Cross	10	30
Grinding	Longitudinal	10	30
	Cross	10	30

Table 3 Abrasive flow machining conditions

Material of media	High-molecular synthetic resin and grease
Material of abrasive grain	Diamond
Mean diameter of abrasive grain	30 μm
Mixing ratio of abrasive grain	about 80 wt%
Extruding pressure	9.8 MPa {100 kgf/cm ² }
Flow sectional area	75 mm ²
Reciprocating time of hydraulic cylinder	60 s

定値を示す⁽⁹⁾が、Coの体積率はWCに比べ小さいので、本測定はWC相を対象として行いこの残留応力値を採用した。

3. 実験結果及び考察

3.1 砥粒流動加工面の状態 図3はWED材と研削材の砥粒流動加工面の写真である。(a),(b)が加工前、(c),(d)が30分加工後である。加工時間10分のは30分と同様なので省略する。これらの写真より、砥粒流動加工によって鏡面状態の加工面が得られることがわかる。また、図4はWED材と研削材に砥粒流動加工を30分行った表面のSEM写真であり、それぞれにメディアの流れ方向を矢印で示してある。図より、(a)~(d)全てに砥粒流動加工の研磨条痕が加工方向に観察される。

次に、図5は砥粒流動加工時間による表面粗さの変化を示したものである。(a)がWED材、(b)が研削材で、それぞれに長手方向と幅方向の粗さを表示した。図より、WED材、研削材とも表面粗さが大きく向上しており、砥粒流動加工がWC-Co超硬合金に対して極めて有効な研磨法であることがわかる。

Fig.3 Various machined surfaces of specimens

Fig.4 SEM micrographs of abrasive flow machined surfaces

このうち(a)のみに注目すれば、砥粒流動加工後の幅方向の表面粗さは長手方向に比べはるかに良好になっており、加工前の表面粗さの方向による違いが残存している。また、加工時間が10分以上になると表面粗さはほとんど変化しない傾向がみられる。この傾向は幅方向の砥粒流動加工(以後、幅研磨とよぶ)で顕著に現れるが、長手方向の砥粒流動加工(以後、長手研磨とよぶ)を行ったものの長手方向の表面粗さ(●印)にはばらつきがみられた。

一方(b)では、長手研磨、幅研磨とも加工時間10分以上での表面粗さはあまり改善されていない。

このように加工時間10分以上で表面粗さの大きな向上がみられなくなるのは、次のように考えられる。すなわち、砥粒流動加工は図6に示すように加工初期段階では砥粒が加工表面の凸部のみに接して表面粗さは加工の進行にしたがい向上していくが、表面がある程度滑らかになるとメディアの弾性力により砥粒が凹部にも同じ圧力で接するようになるため、その凹凸に倣って研磨加工が進行し、加工時間を長くしても表面粗さは大きくは変化しなくなる。したがって、本実験の場合WED材、研削材とも砥粒流動加工前に約 $0.4\mu\text{mRy}$ では、 $0.1\mu\text{mRy}$ 程度が限界であることが図5よりわかる。また、加工前に $1.2\sim 1.4\mu\text{mRy}$ の方向は30分の加工時間では $0.1\mu\text{mRy}$ まで達していないことから、砥粒流

Fig. 5 Variation in surface roughness with machining time

Fig.6 Machining model

動加工後の表面粗さは加工前の粗さに依存すると考えられる。

次に、砥粒流動加工時間と研磨除去厚さの関係を図7に示す。この図より、長手研磨、幅研磨とも加工時間により除去厚さが増加しているが、WED材ではワイヤ方向と同方向に磨く幅研磨(■印)、研削材では研削筋と直角に磨く幅研磨(□印)の除去厚さが大きくなっていることがわかる。一般的に、ラッピングやポリッシングを行うときその加工方向を前工程の条痕と交差させるという経験則があるが、本実験の研削材の場合は幅研磨(□印)のほうが除去量が多く、図5(b)に示したように表面粗さもよいことから、経験則通りに砥粒流動加工を行うことが有効であるといえる。一方、WED材は長手方向の表面粗さが大きいにもかかわらず、除去厚さが幅研磨(■印)で大きくなっており、研削とは違った傾向を示している。このことから、WEDの加工変質層を砥粒流動加工で除去する目的にはワイ

Fig. 7 Variation in removed thickness with machining time

Fig. 8 Variation in residual stress with machining time

ヤと同方向で研磨を行うほうが効率的といえる。

3.2 表面残留応力 図8に砥粒流動加工を行ったときの表面残留応力の変化を示す。WED材では本加工前には引張の残留応力が発生しているが、長手研磨、幅研磨ともこれが圧縮の方向に変化し、とくに幅研磨では-400MPa前後の残留応力になっている。また、研削材では大きな圧縮の残留応力が、砥粒流動加工を行うことにより減少しており、幅研磨30分の値は-400~-500MPaになっている。

これらWED材、研削材の両値は、蒲地らの報告⁽¹⁾による焼結面の残留応力値に近い値である。また、田中ら⁽¹⁰⁾によるラッピング後の残留応力値とも近い値を示している。これらより、砥粒流動加工はラッピング、ポリッシング加工と同様に残留応力をほとんど生じない研磨加工であるといえる。

3.3 曲げ破壊強度 図9は各試験片の曲げ破壊強度をワイブル分布図に示したものである。本実験の場合試験片の数が少ないので、実験結果のプロットには累積破壊確率として対称試料累積分布法⁽¹¹⁾の $(i-0.5)/n$ を用いた。ここで n は標本数、 i は順序数である。また、図10は曲げ破壊強度の平均値をとりその変化を表したものである。両図より、研削材は全般的にWED材より

Fig. 9 Weibull distribution of bending fracture strength

Fig. 10 Mean value of bending fracture strength

強度がかなり大きくなっている。またWED材においては、WEDのままに比べ砥粒流動加工した試験片の強度はいずれの場合も向上し、最大1000MPa程度増加している。とくに幅研磨では、磨き条痕が破断方向と一致しているにもかかわらず強度が大きくなっており注目される。

一方研削材においては、砥粒流動加工後の強度は研削のままより92~433MPa大きくなっている。超硬合金では、表面が研磨状態より研削状態のほうが強さが優れているという報告⁽¹²⁾があるが、本実験ではこれと異なり砥粒流動加工で強度が増加しているのが注目される。

3.4 破壊形態 図11に3点曲げ試験を行った試験片の破壊状況の概観を示す。(a)から(e)まではWED材であり(f)は研削材の一例である。これ以外の研削材も砥粒流動加工の有無に関係なく同程度の破片数になっている。この図より、曲げ破壊強度が大きくなるに

Fig. 11 Appearances of fractured specimens

Fig.12 Photographs of fracture surfaces

つれて破片数は多くなることがわかる。

図12に破断面の例を示す。(a)はWEDのまま、(b),(c)はWED材の幅研磨および(d)は研削のままのものである。(a),(b)は破壊の起点が明確で、その伝ば模様が観察されるが、(c),(d)でははっきりわからない。これらの試験片の表面に近い破断面をSEMで観察すると、いずれも図13のような境界破壊の様相を示している。また(a),(b)にみられる破壊起点にはボイドなどの欠陥が存在するという報告⁽¹³⁾があるが、今回の観察ではこれらを発見することはできなかった。

3.5 考察 図14に曲げ破壊強度と表面残留応力の関係を示す。WED材(黒印)では、表面残留応力が引張から圧縮方向に変化するのにもともない強度が大きくなっていることがわかる。この強度変化は幅研磨により顕著になっている。この結果は幅研磨の残留応力が圧縮側にあることに起因しているといえる。図7によればWED幅研磨10分はWED長手研磨30分より研磨除去厚さが小さくなっていることから、砥粒流動加工ではWEDのワイヤ方向にメディアを流すことにより、除去量が少なくても引張残留応力を減少させることができ、曲げ破壊強度も向上すると考えられる。

一方、研削材(白印)では研削によって発生した大きな圧縮残留応力が砥粒流動加工により小さくなっていくが、これにともなう強度の低下はみられない。これ

Fig. 13 SEM micrograph of fracture surface

Fig.14 Relationship between bending fracture strength and residual stress

Fig.15 Relationship between residual stress and surface roughness of grinding pre-process

は図15に示すように、表面粗さの改善による強度増加と圧縮残留応力の減少による強度低下が相殺するように作用し、その結果として曲げ破壊強度がわずかに増加したものと考えられる。

次に、両加工材の大きな強度差につき考察する。まず、図14中の幅研磨(□・■印)のみに注目する。研削幅研磨30分とWED幅研磨30分およびWED幅研磨10分は、残留応力がほとんど同値であるのに曲げ破壊強度に大きな差がある。これは、図5に示した表面粗さの相違に起因すると共に、図12の破面写真などから判断すると次のように考えられる。WED加工面にはマイクロクラック⁽¹⁾や脆硬層⁽²⁾があり、砥粒流動加工の進行により研磨除去厚さが大きくなると、これらの欠陥で破壊の起点となるような致命的なものが減少していく。WED幅研磨30分は、WED幅研磨10分より除去厚さが大きいので、この欠陥の数は少なくなっており強度が大きい。4 μm 程度の除去厚さであるためまだ十分欠陥を取り去っておらず、いくつかの欠陥から破壊が同時に発生したと推定される。このことは図11(e)のWED幅研磨30分の破片数が(f)の研削のままに比べ少ないことから明らかである。研削面ではWED面のような大きな欠陥は存在しないので、曲げ荷重により大きな弾性エネルギーが蓄積され破壊時にこれが一気に破壊エネルギーに変換され何か所か同時に破断する。したがってWED幅研磨30分は、破断面では研削に近い様相を示すが強度においては約1000MPaもの差が現れているものと考えられる。

4. むすび

本実験によって得られた結果は以下の通りである。

- (1) WED材と研削材に、試験片の長手方向と幅方向に砥粒流動加工を施したところ、いずれの方向においても大幅な表面粗さの改善がみられた。
- (2) 砥粒流動加工による表面残留応力の変化を調べた

ところ、WED材では本加工前に1000MPa程度の大きな引張残留応力が存在していたものが、約400MPaの圧縮残留応力に変化した。一方、研削材では約2000MPaの圧縮残留応力がこの加工により500~1000MPa程度に減少した。

(3) 曲げ破壊強度はWED材では砥粒流動加工により最大60%増加したが、研削材では約10%の増加にとどまった。この加工の長手方向と幅方向の影響をみると、WED材では幅方向に加工したものは長手方向より若干強度が大きくなったが、研削材ではほとんど差はみられなかった。

(4) 砥粒流動加工によるこのような曲げ破壊強度の変化はつぎのように考えられた。WED材では本加工による残留応力の引張から圧縮への変化と前加工により発生したマイクロクラックの除去作用により強度が大幅に増加したのに対し、研削材では本加工による表面粗さの減少による強度増加と圧縮残留応力の減少による強度減少が相殺し、全体としては若干の強度増加にとどまった。

(5) 以上のことからWC-Co超硬合金に対する砥粒流動加工はその強度を増加させ、かつ十分な表面性状を得ることができる極めて有効な加工法であることが明らかとなった。

なお、本研究の遂行にあたり実験等にご指導ご協力をいただきました長野県精密工業試験場 増田雪也氏、(株)東洋エクスツルドホーン 山中豊氏、押見泰志氏に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- (1) 蒲地・伊藤・山本・中村, 日本金属学会誌, 52-6(1988), 581-587.
- (2) 土屋・福田・池・鈴木, 粉体および粉末冶金, 39-2(1992), 98-102.
- (3) 後藤・増田・神田・杉本・小林, 先端加工, 14-9(1995), 33-39.
- (4) 坂本洋, 機械技術, 36-9(1988), 30-35.
- (5) 坂本洋, 機械と工具, 3(1988), 49-55.
- (6) 精密工学会編, 精密工作便覧, (1992), 438, コロナ社.
- (7) 鈴木壽編, 超硬合金と焼結硬質材料, (1995), 133, 丸善.
- (8) 日本材料学会編, X線応力測定法, (1990), 60, 養賢堂.
- (9) 後藤・神田・杉本・小林, 機論, 61-589, A(1995), 1927-1932.
- (10) 田中・松井・田中, 材料, 42-472(1993), 96-102.
- (11) 酒井・田中, 材料, 31-348(1982), 941-947.
- (12) 鈴木・林, 日本金属学会誌, 39-7(1975), 754-759.
- (13) 鈴木壽編, 超硬合金と焼結硬質材料, (1995), 147, 丸善.