

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 4 月 11 日現在

機関番号：13101

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009～2011

課題番号：21560112

研究課題名（和文）ワイヤ放電加工された超硬合金のクラックレス化

研究課題名（英文）Creation of Wire Electrical Discharge Machined Surface without Cracks in Cemented Carbide

研究代表者

田村 武夫（TAMURA TAKEO）

新潟大学・自然科学系・准教授

研究者番号：90115048

研究成果の概要（和文）：超硬合金を加工する一つの方法として、一般的にワイヤ放電加工が使用されている。しかしながら、クラック、微小穴や溶融再凝固層などの表面欠陥は、表面健全性を低下させる。本研究では、表面欠陥を完全に除去する目的でワイヤ放電加工によるオンザマシン表面改質技術が開発された。結果として、ワイヤ放電加工によって生成された表面欠陥は、ワイヤ放電加工に SI-cut 工程を組み込むことで完全に除去された。このようにこの表面改質技術は、ワイヤ放電加工された超硬合金を仕上げる有効な方法である。

研究成果の概要（英文）：As a method of processing cemented carbide, wire electrical discharge machining (WEDM) is generally used. However, typical surface defects, such as cracks, microcraters and recast layer, lead to a decreased surface integrity. Thus, an on-the-machine surface modification technology in WEDM, for the complete elimination of surface defects, was developed in this study. As a result, the surface defects generated by WEDM could be completely eliminated by incorporating SI-cut into WEDM. Thus, this surface modification technology is effective for finishing cemented carbide machined by WEDM.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2010 年度	500,000	150,000	650,000
2011 年度	300,000	90,000	390,000
総計	2,100,000	630,000	2,730,000

研究分野：工 学

科研費の分科・細目：機械工学、生産工学・加工学

キーワード：超硬合金、ワイヤ放電加工、溶融再凝固層、クラックレス、SI-cut、表面改質

1. 研究開始当初の背景

超硬合金をワイヤ放電加工する場合、最小の放電エネルギーを用いても、その加工面に

はクラックが発生する。このクラックは金型などの早期破損の主要因となることから、生産現場では、その対策として主に手作業によ

る磨きが行われている。

しかし、熟練者に頼らざるを得ない磨き工程は、多くの時間とコストを必要とする。また、大きな問題点として、すべてのクラックを完全に除去することは難しいこと、形状精度を損ねてしまうこと、および熟練者不足が挙げられる。

これらの諸問題をすべて解決する、画期的な方法を開発する。それが、「ワイヤ放電加工によるオンザマシン表面改質技術」である。これは、超硬合金をワイヤ放電加工で成形するとともに、同じ放電加工機上でSI-cut(Surface integrity cut)工程を導入することにより、ワイヤ放電加工による溶融再凝固層(この層内にクラックは存在)のみを選択的に除去するものである。

2. 研究の目的

提案する「オンザマシン表面改質技術」は、すでに基礎的な実験が進められている。実用化を視野に入れた場合、解決すべき諸問題が浮かび上がり、これを研究目的とし、以下に示す。

- (1)SI-cut面のクラックレス化を詳細に調べる
- (2)SI-cutの成功率を100%に近づけるための加工条件の確立。
- (3)「なぜ溶融再凝固層のみが選択的に除去されるのか?」を解明すること。
- (4)任意の形状(一例としてトロコイド曲線)をもつ金型に対して、SI-cutを適用し、クラックレス化を実現すること。

3. 研究の方法

(1)SI-cut 面のクラックレス化を評価

ワイヤ放電加工面とSI-cut面は、加工面の色あいで区別することができる。前者は、溶融再凝固層に覆われているため、白っぽい光沢のない面に、一方、後者は溶融再凝固層が除去され、母材が現出することから、青みがかかった面になる。従って、SI-cutが成功したかどうかは加工面の色あいでほぼ判断することができる。しかしながら、SI-cut面にクラックがあるかどうかは電子顕微鏡で正しく評価することが望ましい。そこで、SI-cut面のクラックレス化を走査型電子顕微鏡で詳細に観察する。

(2)SI-cut 加工条件の確立

オンザマシン表面改質技術を実用化するためには、SI-cutの成功率を限りなく100%に近づけることが急務である。幸いなことに、SI-cutに成功した加工面は、すべて青みがかかった様子を呈することから、簡易的には加工後の色合いでSI-cutが成功したかどうかを判断することができる。SI-cutは、電解か放電に移行するかの臨界条件で達成されるものと考えている。そのためには、無負荷電圧、ワイヤ

と超硬合金とのギャップ長、脱イオン水の掛け方などを適正に設定すること、すなわちSI-cutの加工条件を確立する。

(3)改質メカニズムの解明

オンザマシン表面改質では、放電による溶融再凝固層のみが電解によって除去されているものと考えている。超硬合金の主成分は、炭化タングステンWC粒子であり、焼結状態では六方晶の結晶構造となっている。一方、溶融再凝固層では、炭化タングステンWCは面心立方晶と稠密六方晶の結晶構造であり、その結晶構造の違いが改質メカニズムを解明する上で、鍵を握る因子であると考えている。

(4)任意形状金型へのSI-cutの試み

ワイヤ放電加工で製作される超硬合金製のパンチやダイスでは、異形状なものが多く、SI-cutが任意形状にも適用できるかどうかを検討することが必要となる。ここでは実際にポンプで使用されるトロコイド曲線に対して、SI-cutを試みる。

4. 研究成果

(1)SI-cut 加工条件

表1はワイヤ放電加工による成形から表面改質までの加工条件を示す。直流電源による掛け流し方式で実験が行われた。すなわち、工作物は+極、ワイヤ電極は-極として、その極間に脱イオン水を掛け流して加工が行われる。したがって条件が整えば、放電は発生せずに電解のみが作用することとなる。2nd-cutまでの工程は、通常行われている一般的なものであり、3rd-cutは成形された超硬合金に付着した黄銅成分をできるだけ除去するために導入された。その理由は、超硬合金に付着した亜鉛は卑な金属であり、SI-cutにおける電解エネルギーの一部が亜鉛の溶出に使われることになるからである。表に示した2nd-cutのワイヤオフセットは、1st-cut時の軌跡より、ワイヤ電極が+15 μ m工作物に近づくことを意味している。

次に、最終工程のSI-cutでは、電解のみが作用するように条件を設定することが必要不可欠となる。加工中に1回でも放電が発生したら、そこには溶融再凝固層が形成され、場合によってはクラックが発生することになる。そこで放電の発生を防ぐSI-cut条件と

表1 加工条件

	1st-cut	2nd-cut	3rd-cut	SI-cut
電 源	直流電源			
無負荷電圧 [V]	90	200	200	110
放電電流 [A]	107	16.5	16.5	<0.1
放電持続時間 [μ s]	1	1	1	1
休止時間 [μ s]	16.8	16.8	16.8	16.8
ワイヤ	黄銅 ϕ 0.25			
オフセット [μ m]		15	15	0

して、次の3点が挙げられる。はじめに、ワイヤオフセット 0 μm 、すなわち 3rd-cut 時と全く同じ軌跡をワイヤ電極が通る。次に、ワイヤ電極と工作物間に印加される電圧、すなわち無負荷電圧を 3rd-cut の場合よりも低下させることで、放電は誘発されにくくなる。最後に、ノズルからの加工水供給圧を 196kPa と低く設定し、緩やかに加工水を掛け流すことで、電解作用がより安定化するように工夫した。SI-cut 工程では電解が作用することから、脱イオン水の導電率は重要なパラメータである。導電率が 30 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 以下では十分に表面改質は達成されるものの、ここでは SI-cut 後の表面粗さを小さくする目的で 5 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 程度の脱イオン水を用いた。

(2) 超合金ワイヤ放電加工面

はじめに表 1 に示す条件で超合金にワイヤ放電加工を行った。図 1 は、ワイヤ放電加工面の様子を SEM 像で示す。これは 3rd-cut の加工面であり、放電電流は 16.5A、放電持続時間は 1 μs であった。典型的なクラックや微小穴が破線で示されている。高倍率のため、写真は微小領域の観察結果を示したものであるが、ランダムに走査して得られる加工面は、ほぼ同様の形態であり、加工面全体にわたって、クラックや微小穴が数多く分布していた。

(3) SI-cut 面

図 1 に示した 3rd-cut ワイヤ放電加工面に、引き続き SI-cut を行い、その加工面の様子を図 2 に示す。炭化タングステン粒子が全面にわたって存在している。SI-cut 面を広範囲に観察した結果、クラックや微小穴はまったく検出されず、SI-cut 面全体がクラックレスな面に改質されていた。このように、SI-cut 面にはクラックや微小穴などの表面欠陥は、まったく存在していなかった。

(4) X 線回折による加工屑の同定

SI-cut 直後には、加工面に表面残留物が付着している。表面残留物は非常に離性に優れており、爪でこする程度の作業で簡単に加工屑として回収することができる。そこで、加工屑に含まれる化合物の種類を同定するために、加工屑を多量に採取して X 線回折を行った。比較をするために、はじめに納入状態の超合金から得られた回折パターンを図 3 に示す。回折角度 2θ を横軸に取り、縦軸は回折 X 線の強度である。納入状態では、超合金の主成分である炭化タングステンは、六方晶の結晶構造をしている。各回折線のピークは、六方晶の格子定数 ($a=2.91\text{ \AA}$ 、 $c=2.84\text{ \AA}$) から計算した回折角度とよく一致する。図では炭化タングステン WC の 3 強線に回折角度も併記してある。

次に、加工屑から得られた回折パターンを図 4 に示す。全体的にバックグラウンドの信号が大きく、広角側では WC のピークが一部

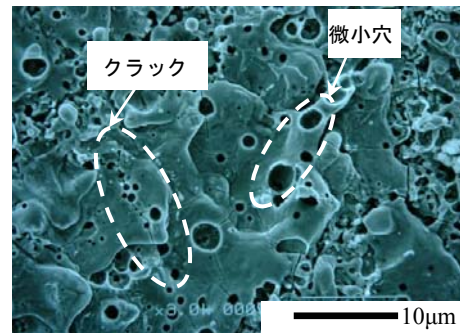


図 1 ワイヤ放電加工

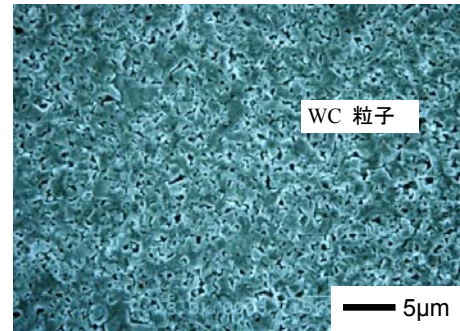


図 2 SI cut 面

判別しにくい。両者の回折パターンを比較すると、各回折ピークはよく一致していることがわかる。加工屑においても WC の 3 強線は、明瞭に現れており、それらの回折角度は図 3 で得られたものとほぼ一致している。一般的に、超合金の電解現象では炭化タングステンは陽極反応で酸化されて WO_3 となることが知られている。しかしながら、SI-cut によ

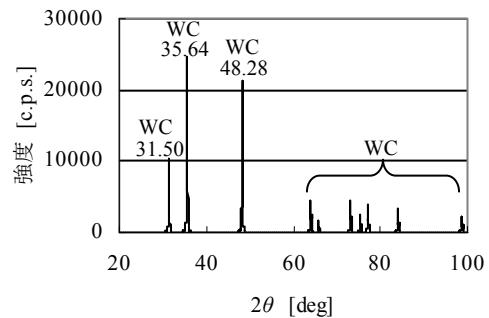


図 3 納入状態の X 線回折パターン

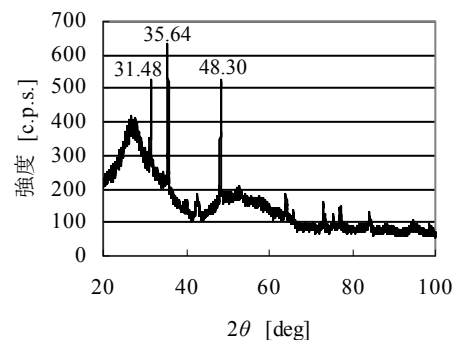


図 4 加工屑の X 線回折パターン

って除去された加工屑の中には、 WO_3 は検出されずに加工屑はWC粒子で構成されていた。

(5) 表面改質機構モデル

以上述べてきたようにSI-cutに関する知見より、以下に示す改質機構が推測される。図5は、表面改質機構を模式的に示したものである。ワイヤ放電加工断面は、図5(a)のように模式化できる。熔融再凝固層にはクラックや微小穴が入り、熔融再凝固層と母材との界面には空隙が多く存在している。クラックの進展は主に熔融再凝固層内に留まり、母材界面の空隙とつながっている。SI-cut工程において、最表面層である熔融再凝固層も電解作用を受けるものの、脱イオン水はクラックや微小穴を介して母材界面の空隙へ供給される。熔融再凝固層は塊として脱落していくこと、またSI-cut後の表面層ではコバルトが疎になっていることから、SI-cut工程では母材の方が熔融再凝固層よりも溶出しやすいものと考えている。図5(b)に示すように、母材界面にあるコバルトは優先的にコバルトイオンとなって脱イオン水中に溶出するか、コバルトの水酸化物 $Co(OH)_2$ になるものと考えている。その結果、母材界面のコバルトは、結合材としての機能を失う。図5(c)に示すように、遊離状態となった熔融再凝固層は、ギャップに供給される脱イオン水によって洗い流されてブロック状の加工屑となる。このようにしてSI-cut後、依然として加工面に付着している表面残留物を軽く洗浄すること

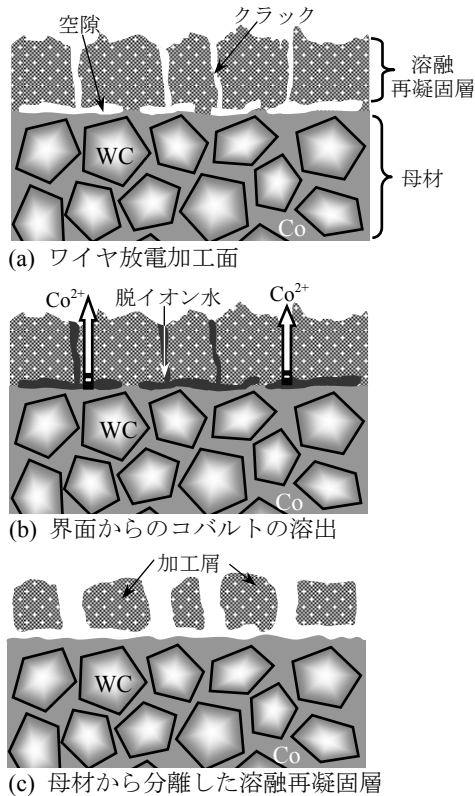


図5 SI-cutにおける表面改質機構(断面)

表2 トロコイド金型の加工条件

	1st-cut	4th-cut	SI-cut
無負荷電圧 [V]	80	120	100
オフセット [μm]	70	6	10
導電率 [$\mu\text{S/cm}$]	30	30	20
送り速度 [mm/min]	3.6	6	2

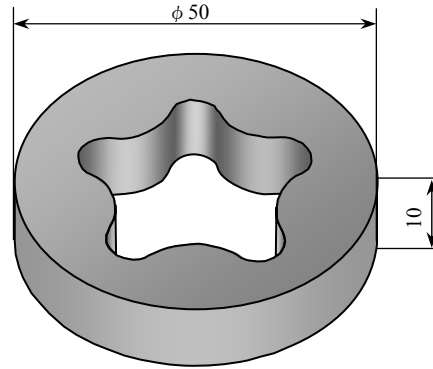


図6 トロコイド金型

で、SI-cut面全体が図2に示した炭化タンゲステン粒子群で覆われるクラックレスな面へと改質される。以上のことから、ワイヤ放電加工によって低下した超硬合金の表面健全性は、SI-cutを導入することによって大幅に回復するものと考えている。そして、SI-cutは、脱イオン水中でワイヤ電極と超硬合金との間で起こる特異的な電解作用にもとづいている。

(6) トロコイド金型へのSI-cutの適用

このようにオンザマシン表面改質技術は、ワイヤ放電加工された超硬合金加工面をクラックレスにすることができる。そこでこの技術の実用化に向けて、次のような実験を行った。

はじめに製作する超硬合金金型は、工業的によく利用されているトロコイド形状とした。図6は試料の模式図と寸法を示す。直径50mm、厚さ10mmの超硬合金にオンザマシン表面改質技術を導入して、トロコイド金型を成形した後、SI-cut工程で金型内面の表面改質を行った。

次に、ワイヤ放電加工機として(株)牧野フライス製作所製ワイヤ放電加工機U32Kを用いた。この加工機は、現在、生産現場で使われているものであり、最適な加工条件を自動的に選定する最新の機能が備わっている。

① トロコイド金型の加工条件

表2は、トロコイド金型の成形から表面改質までの加工条件を示す。表1で述べた条件を参考にして試行錯誤的に決定したものである。これはワイヤ放電加工機上で成形工程(1st-cut~4th-cut)から表面改質工程(SI-cut)まで行うことができ、この2つ工程では加工条件が異なる。ただし、送り速度は、成形工程

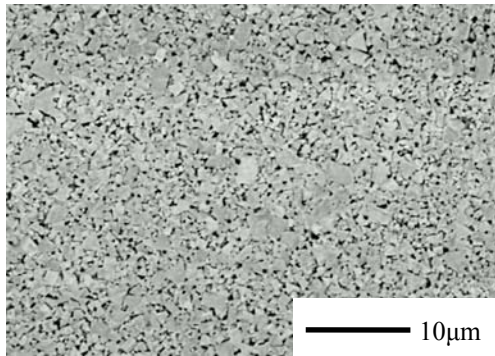


図7 SI-cut後のトロコイド金型内面

ではサーボ送りのため実測値、SI-cutではテーブル送りとなっている。

②SI-cut後のトロコイド金型内面

図7は、SI-cut後のトロコイド金型内面の様子を示す。ここでは金型内面の様子を詳細に観察するため、ダイヤモンドペーストで軽く磨いている。ただし、除去量に換算すれば、1μm未満であり、SI-cut後の表面状態をほぼ維持しているものと考えている。表2に示した4th-cut後の金型内面は、図1に示したようにクラックや微小穴が数多く存在していた。それに対して、SI-cut後の加工面では、全体にわたって炭化タングステン粒子群に覆われており、クラックや微小穴は、検出することができなかった。

このように本研究で開発したオンザマシン表面改質技術は、特許を取得したことからもわかるように、国内初の技術であり、今後、ワイヤ放電加工された超硬合金金型をクラックレス化できる有望な手法であると考えている。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計2件)

①田村武夫、金子倉之介、ワイヤ放電加工によるオンザマシン表面改質技術の開発、電気加工学会誌、査読有、45巻、2012、14-22

②Takeo TAMURA、Kuranosuke KANEKO、Development of On-the-Machine Surface Modification Technology in WEDM、16th International Symposium for Electro-machining (Shanghai, China)、査読有、1巻、2010、233-236

〔学会発表〕(計4件)

①森山佑蔵、田村武夫、ワイヤ放電加工された超硬合金ダイの研磨に関する研究、電気加工学会、2011年11月25日、つくば研究交流センター(茨城)

②高橋智洋、田村武夫、オンザマシン表面改質技術の浸漬加工への適用、電気加工学会、2010年11月26日、アクトシティ浜松(静岡)

③杉田博紀、田村武夫、ワイヤ放電加工におけるオンザマシン表面改質技術の表面健全

性、精密工学会、2010年11月6日、長岡技術科学大学(新潟)

④光山龍之介、田村武夫、ワイヤ放電加工機によるオンザマシン表面改質技術に関する研究、電気加工学会、2009年11月26日、メルパルク京都(京都)

〔産業財産権〕

○取得状況(計1件)

名称：ワイヤ放電加工の表面改質方法

発明者：田村武夫、金子倉之介

権利者：新潟大学

種類：特許

番号：特許4892682号

取得年月日：2012年1月6日

国内外の別：国内

6. 研究組織

(1)研究代表者

田村 武夫 (TAMURA TAKEO)

新潟大学・自然科学系・准教授

研究者番号：90115048

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし