論文

PCD 製工具によるアルミニウム合金板 およびステンレス鋼板の無潤滑打抜き加工

古閑 伸裕* 姜 文赫** 薄 憲毅**

Blanking of Aluminum Alloy and Stainless Steel Sheets Using Polycrystalline Diamond Tools without Lubricant

Nobuhiro KOGA*, Wenhe JIANG** and Kazuki USU**

(Received on September 27, 2012)

Continuous blanking was carried out using polycrystalline diamond (PCD) tools without a lubricant with the aims of developing the technologies required to apply these tools to shearing and of putting them to practical use. The adhesion of an A5052 aluminum alloy sheet subjected to blanking to the PCD tools was markedly reduced compared with that in the case of conventional SKD11 tools. It was also clarified that a high-precision sheared surface with properties similar to those obtained in the first blanking can be obtained even after 10,000 times of blanking. In addition, the adhesion of a SUS304 stainless-steel sheet to the PCD tools was prevented during the blanking, and the wear resistance of the PCD tools was markedly improved as compared with that of conventional tools. The properties of the sheared surface obtained after blanking 200,000 times were similar to those of the sheared surface obtained in the first blanking. The burr height and inner and outer diameters of the workpiece obtained after blanking 200,000 times did not change, demonstrating that high-precision sheared surfaces can be stably obtained. The above results show that PCD tools can be practically used in blanking.

Key words: sheet metal forming, shearing, blanking, PCD, without lubricant.

1. 緒 言

プレス加工のなかで唯一材料の破壊を伴う打抜きや穴あけなどのせん断加工では、工具刃先付近に大きな衝撃力が作用し、同箇所では材料のすべり量も大きい。また、工具刃先や側面には被加工材の凝着も発生しやすい。このため、加工回数の増加に伴い工具摩耗の進行やチッピングなどの工具の損傷が発生しやすくなる。

すなわち、アルミニウム合金板などの打抜きでは、特に工具刃先や側面への被加工材の凝着が激しく、これが原因となって切口面に大きな塑性バリと呼ばれる大きなかえりが発生するケースが多い¹⁾。また、鋼板などの打抜きでは、工具刃先や側面に作用する大きな圧力と材料すべりにより、ひっかけ摩耗による早期の刃先の摩耗（鈍化）や、凝着摩耗による工具側面摩耗が発生する。このため、工具の被加工材への食込み抵抗が増しだれが増大する。また、刃先の鈍化と工具側面の摩耗によるクリアランスの実質的な増加により、かえりが増大する。

このような凝着や摩耗を防止する方法として、硬質膜コーテッド工具の利用がある。特に、DLC コーテッド工具はアルミニウム合金板の打抜きでは、凝着発生防止効果が極めて高いことが明らかにされている¹⁾。また、鋼板の打抜きでは、TiCN コーテッド工具などを利用すると工具側面の摩耗時期を遅らせることができ、結果的に工具の寿命向上が図れることが明らかにされている²⁾。しかし、このコーテッド工具の利用は、再コーティングの煩雑さやこれに伴う金型のメンテナンスに要する時間などを考慮すると、せん断加工においてコーテッド工具の特長を十分に生かせるケースは限られているように思われる。

著者らは、すでに多結晶ダイヤモンド焼結体（PCD：Sintered polycrystalline diamond）³⁾の塑性加工工具への適用技術の開発に着手しており、これまでに深絞り加工⁴⁾、⁵⁾やしごき加工⁶⁾における PCD 製工具の有効性を明らかにしている。

せん断加工においても PCD 製工具が利用できれば、コーテッド工具と同様の効果が発揮され、コーテッド工具を利用する場合の問題点が解消できることが期待できる。すなわち、アルミニウム合金板などのせん断では、コーテッド工具と同様に凝着物の発生が抑制される。また、鋼板の打抜きでは、工具刃先や側面のひっかけ摩耗や凝着摩耗が抑制されることが期待できることから、いずれの加工におい

*日本工業大学工学部 〒345-8501 埼玉県南埼玉郡宮代町学園台 4-1
Department of Mechanical Engineering, Nippon Institute of Technology,
4-1 Gakuendai, Miyashiro, Minamisaitama-gun, Saitama 345-8501, Japan.

**日本工業大学大学院 同上
Graduate student, Nippon Institute of Technology, Ibid.

ても、安定して高精度の切口面が得られるようになることが期待できる。

しかしその反面、脆性の高いPCDをせん断工具として用いる場合には、高い衝撃力により刃先にチッピングが生じやすくなるのでは、またストリッピング時に工具基材にろう付けしたPCDが剥離するのでは、といった不安がある。

本研究では、上記期待の確認と不安を払拭するため、PCD製工具を内蔵した単抜き金型を用い、アルミニウム合金板とステンレス鋼板のそれぞれについて、無潤滑連続打抜き加工を行い、PCD製工具の有効性と実用性を調査検討する。

2. 実験条件および方法

Fig.1に示す、切り刃部にバルク状のPCDを配したパンチとダイ（寿精密製）を用い、板厚 $t=1\text{mm}$ のアルミニウム合金板と同板厚のステンレス鋼板の無潤滑連続打抜き実験をそれぞれ行い、PCD製工具の有効性と実用性を調査する。

これら PCD 製工具は以下のような方法で製作されたものである。まず、超硬基板上でダイヤモンドとバインダーとなるコバルトの粉末を超高圧高温下で焼結した板状部材から、ワイヤーカット放電加工により所望の形状にチップを切り出す。つぎに、これらチップを超硬製のパンチとダイの基材先端部にろう付けにより接合する。そして、工具の端面と側面を研削やラッピングにより仕上げ加工し、刃先のシャープエッジを成形する。

本実験では、PCDのなかでも靱性に優れ、刃立性がよいとされる超微粒子（平均粒径： $0.5\mu\text{m}$ ）のPCD（住友電工製 DA200）を利用した工具（パンチ、ダイ）を用いた。工具クリアランス C は、スムーズなクラックの発生、成長の観点から適正クリアランスとされる値⁷⁾を設定する。すなわち、アルミニウム合金板の打抜きでは $C=5\%t$ （パンチ = $\phi 3.9\text{mm}$ 、ダイ = $\phi 4.0\text{mm}$ ）、ステンレス鋼板の場合、 $C=10\%$ （パンチ = $\phi 4.0\text{mm}$ 、ダイ = $\phi 4.2\text{mm}$ ）とする。PCDの厚みは、基本的には被加工材の厚み（ $t=1\text{mm}$ ）にパンチとダイの下死点でのオーバーラップ量（ 0.2mm ）を加えた値以上であれば、被加工材の工具への凝着防止効果が発揮できると考えられる。そこで、いずれの材料の打抜きにおいても、パンチとダイの刃先部のPCDの厚みは 1.5mm と

した。また、比較のため、PCD製工具と同形状、同寸法のSKD11製工具も準備し、同様の実験を行う。

これら工具をFig.2に示す構造の金型内にセットし、この金型を最大加圧能力が 300kN のサーボプレスに取付け、アルミニウム合金板の打抜きでは 50spm 、ステンレス鋼板の場合は 30spm のストローク数で、いずれもクランクモーションで加工を行う。この場合、いずれの場合も潤滑油の供給は一切行わないドライ加工とする。被加工材にはTable 1に化学成分と機械的性質を示すA5052アルミニウム合金板とSUS304ステンレス鋼板を用いる。

Table 1 Chemical compositions and mechanical properties of sheets subjected to blanking

[mass%]											
A5052-H18	Al	Fe	Si	Mn	Cr	Cu	Mg	Zn	-	-	-
	Bal.	0.38	0.20	0.10	0.20	0.10	2.60	0.08	-	-	-
SUS304	Fe	C	Si	Mn	Cr	Cu	P	Ni	S	Mo	N
	Bal.	0.05	0.04	1.0	18	0.20	0.03	8.0	0.03	0.10	0.03

Material	Yield strength /MPa	Tensile strength /MPa	Elongation /%	Hardness
A5052-H18	255	300	5.7	HV101
SUS304	304	660	53.1	HV170

3. 実験結果および考察

3.1 アルミニウム合金板の打抜き

まず、SKD11製工具による打抜き実験を行い、2,000回毎に工具性状と切口面の観察を行った。Fig.3に加工前と2,000回、4,000回打抜き後のパンチとダイの性状を示す。2,000回加工後にはパンチ側面に部分的に被加工材と思われる凝着物の発生が認められるようになり、4,000回加工後にはパンチ側面全周にわたり凝着物の発生が認められた。また、ダイ穴内面にも、パンチほどではないが、4,000回加工後には部分的に凝着物の発生が認められた。

Fig.3 Change in surface properties of SKD11 tool with increasing number of blanking repetitions (A5052, $t=1.0\text{ mm}$)

Fig. 1 PCD punch and die

Fig.2 Schematic of blanking die and tools

Fig.4 に打抜き 1 回目, 2,000 回目, 4,000 回目に得られたそれぞれの切口面性状を示す. 打抜き加工中やストリッピング時にパンチ側面に接していた穴側切口面は, 2,000 回目には 1 回目の切口面には存在していた破断面が認められなくなり, 切口面のほぼ全域が削られたような切口面に変化した. そして, 4,000 回目には凹凸の大きな切口面となり, Fig.5 に示すように, 打抜き方向に塑性ばりと呼ばれる大きな突起物 (かえり) の発生が認められるようになった. そして, この 4,000 回目に得られた切口面には, だれ発生側の切口面端部にもかえり状の突起物の発生が認められた. これはパンチから穴側材料がストリッピングされる際にパンチ側面の凝着物によって切口面の一部が削られ発生したと推察される.

ダイ穴下方に抜き落とされる打抜き品の切口面は, 4,000 回目においても 1 回目に得られた切口面に比べてその性状が大きく変化することなく, 破断面が切口面の 70~80% を占める切口面性状であり, 加工回数の増加に伴うかえり高さの増大もほとんど認められなかった.

このように穴側と抜き落とし側の切口面が大きく異なるのは, ダイ内面は抜き落とし品が下方に落下する際に接触するだけであるのに対し, パンチ側面はせん断加工中とストリッピング時のいずれのストローク域においても穴側材料の切口面と接触するためと考えられる. すなわち, パンチ側面は切口面と接触しているストロークが長くなることで, ダイ内面に比べより被加工材の凝着が顕著となり, この凝着物により切口面がこすられることで性状がより悪化したと考えられる. しかし, 4,000 回後にはダイ側面にも凝

Fig.4 Change in blanked surface properties with increasing number of blanking repetitions using SKD11 tool (A5052, $t=1.0$ mm)

Fig.5 Change in burr height of cut-end surface with increasing number of blanking repetitions using SKD11 tool (A5052, $t=1.0$ mm)

着物の発生が認められるようになってきていることから, さらに打抜き回数が増えれば, 抜き落とし側切口面も性状が悪化することが予測される.

つぎに, PCD 製工具による打抜き実験を行った. Fig.6 に加工前, 4,000 回および 10,000 回加工後のパンチとダイの性状を示す. 10,000 回の連続打抜きを行ってもチップングやろう付け部からの PCD の剥離などは発生しなかった. また, 10,000 回加工後のダイ端面には打抜き時に発生したアルミニウムの粉が堆積したと思われる白化が認められた

Fig.6 Change in surface properties of PCD tool with increasing number of blanking repetitions (A5052, $t=1.0$ mm)

Fig.7 Change in blanked surface properties with increasing number of blanking repetitions using PCD tool (A5052, $t=1.0$ mm)

Fig.8 Change in burr height of blanked surface with increasing number of blanking repetitions using PCD tool (A5052, $t=1.0$ mm)

ものの、パンチやダイの刃先や側面には被加工材の凝着はほとんど認められなかった。また、刃先の摩耗もほとんど認められなかった。このため、Fig.7 に示すように、4,000 回目や10,000 回目に得られた穴側および抜き落とし側の切口面は、1 回目に得られた切口面に対し、ほとんど変化が認められず良好なものであった。また、PCD 製工具による打抜きでは、Fig. 8 に示すように 10,000 回までかえり高さの増大はほとんど認められなかった。

3.2 ステンレス鋼板の打抜き

鋼板の打抜きでは、アルミニウム合金板の場合に比べ工具に作用する衝撃力が大きくなるため、チッピングやPCDの基材からの剥離などの工具不良の発生がより懸念される。

硬質膜コーテッド工具による鋼板の打抜き²⁾では、刃先部分は加工早期に硬質膜が剥離するため、刃先の摩耗防止は困難であり、またコーテッド工具の利用により側面の摩耗の増大時期を遅らせることはできても、その根本的な解決策にはなり得ない。すなわち、上記工具不良が発生することなくPCD製工具による鋼板の打抜きが可能になれば、アルミニウム合金板の打抜き以上にその利用価値が高まることは明白である。

ステンレス鋼板の打抜きにおいても、まずSKD11製工具による実験を行った。Fig.9 に5万回および10万回打抜き後のそれぞれの工具刃先性状を示す。10万回加工後には、加工中に被加工材の切口面と接触していたと思われる刃先から約1.3mmのパンチ側面に大きな摩耗が発生し、摩耗量の不均一により刃先輪郭の真円度が大きく悪化する現象が認められた。また、ダイもパンチほどではないが、側面摩耗の発生が認められた。これにより実質的にクリアランスが増大し、1回目より5万回目や10万回目に得られた切口面のほうが破断面の切口面に占める割合が増加する傾向が認められた。また、加工回数が増すと、大きなかえりが局所的に発生する現象も認められるようになった。

つぎにPCD製工具による20万回の連続打抜き加工を行った。Fig. 10 に10万回および20万回加工後の工具性状を示す。加工後にはパンチやダイの側面がわずかに変色する

Fig.9 Change in surface properties of SKD11 tool with increasing number of blanking repetitions (SUS304, $t=1.0$ mm)

程度の変化は認められたが、刃先や側面の摩耗はほとんど認められなかった。また、加工終了時までチッピングやPCDの剥離などの工具不良の発生は一切認められなかった。すなわち、実験に用いた超微粒子PCDは打抜き（せん断）工具に必要とされる靱性を有すること、またPCDの超硬基材とのろう付け強度が打抜きに耐え得る強固なものであることが実証された。

Fig. 11 には10万回打抜き後のSKD11製パンチと20万回打抜き後のPCD製パンチのそれぞれの刃先の形状測定（先端アール半径5μmのスタイラスにて測定）結果を示す。この結果からもPCD製工具の顕著な耐摩耗性向上効果が確認された。

このようにPCD製工具は20万打抜き後もほとんど性状や形状の変化がないため、Fig. 12 に示すように10万回目や20万回目に得られた切口面は初回に得られたものとはほとんど変化が認められなかった。

Fig. 13 に加工回数の増加に伴う、穴側および抜き落とし側切口面のかえり高さの変化を示す。SKD11製工具による打抜きでは、穴側、抜き落とし側いずれも10万回までかえり高さが増大する現象が認められた。これに対し、PCD製工具の場合は、初回から20万回目までかえり高さの変化はほとんど認められず、11~12μm程度の小さなかえりであ

Fig.10 Change in surface properties of PCD tool with increasing number of blanking repetitions (SUS304, $t=1.0$ mm)

Fig.11 Profiles of punch edge after blanking repetitions (SUS304, $t=1.0$ mm)

った。この結果から、PCD 製工具を用いれば、刃先がアール状またはテーパ状に摩耗することなく 20 万回まで安定した加工が行えることが判明した。

打抜き後の穴部平均内径と抜き落とし品平均外径の測定結果を Fig.14 に示す。SKD11 製工具により得られた穴の内径や抜き落とし品の外径は、加工回数の増加とともに変化する現象が認められた。これに対し、PCD 製工具の場合は、20 万回目に得られたものでも初回打抜き品とほぼ同寸法であった。これらの結果から、工具の側面摩耗が激しいステンレス鋼板の打抜きにおいても、PCD 製工具を用いれ

ば、側面摩耗が大幅に低減または防止でき、寸法精度の優れた打抜き品や穴あけ品が安定して得られることが明らかになった。

4. 結 言

多結晶ダイヤモンド焼結体 (PCD) の打抜き工具への適用を目指し、PCD 製工具によるアルミニウム合金 (A5052) 板とステンレス鋼 (SUS304) 板の無潤滑連続打抜き加工実験を行った。以下にその結果をまとめる。

- 1) A5052 板の無潤滑打抜きにおいて、PCD 製工具による加工では、SKD11 製工具の場合のような被加工材の工具への凝着による切口面性状の悪化や塑性バリと呼ばれる大きなかえりの発生がなく 1 万回まで安定した加工が行えた。これは、PCD の被加工材と工具間の摩擦係数の低減効果と、被加工材とのすぐれた親和性改善効果によるためと推測される。
- 2) SUS304 の PCD 製工具による無潤滑打抜きでは、20 万回の加工を行ってもチップングや PCD の剥離などの工具不良は一切認められず、鋼製工具に比べ工具摩耗も極めて小さいことが判明した。このため、切口面の性状、かえり高さ、内外径寸法いずれも 20 万回目に得られたものは 1 回目とほとんど変化が認められなかった。これは靱性の高い超微粒子 PCD を用い、その基材とのろう付け強度が十分なものであったためと推測される。

以上の結果から、打抜き加工においても PCD 製工具の耐凝着性や耐摩耗性向上効果が明らかになり、さらに同工具はチップングや基材から剥離などの不良も発生しないことが判明したため、PCD 製工具は円形打抜き工具として十分実用性があると判断できた。

なお、PCD 製工具の複雑輪郭形状部品の打抜きやストリップング時に大きな引張力が作用する極小クリアランス条件となる精密せん断への適用性などについては、今後の検討課題とする。

本研究の実験をお手伝いいただいた、日本工業大学卒研究生の山崎恵、板橋睦、阿佐美喜一の諸君に感謝する。

本研究は JSPS 科研費の助成を受けたものであることを付記するとともに、本研究の遂行に際し、ご支援、ご協力を賜った天田財団、金型技術振興財団および軽金属奨学会に厚く御礼申し上げる。

参 考 文 献

- 1) Ratchanee Paisarn・羽斗一成・古閑伸裕：軽金属，**54-2** (2004)，57-61。
- 2) 古閑伸裕：塑性と加工，**45-518** (2004)，158-161。
- 3) 鈴木清・二ノ宮進一・岩井学：電気加工学会全国大会講演論文集，(2009)，57-60。
- 4) 古閑伸裕・許昌龍：軽金属，**61-3** (2011)，107-111。
- 5) 古閑伸裕・薄憲毅・許昌龍：塑性と加工，**53-612** (2012)，74-78。
- 6) 薄憲毅・古閑伸裕：平成 24 年度塑性加工連合講演会講演論文集，(2012)，95-96。
- 7) 日本塑性加工学会編：せん断加工，(2000)，19，コロナ社。

Fig.12 Change in cut-end surface properties with increasing number of blanking repetitions using PCD tool (SUS304, $t=1.0$ mm)

Fig.13 Change in burr height of cut-end surface with increasing number of blanking repetitions (SUS304, $t=1.0$ mm)

Fig.14 Changes in inner diameter of sheet and outer diameter of workpiece with increasing number of blanking repetitions