

# WC-Ni 硬質皮膜の適用によるプレスせん断金型の長寿命化

新潟大学 自然科学系 (工学部材料科学プログラム)

准教授 大木 基史

(2021 年度 一般研究開発助成 AF-2021007-B2)

キーワード: WC-Ni 硬質皮膜, 金型長寿命化, 連続打ち抜き試験

## 1. 研究の目的と背景

我が国の金属プレス製品製造業は、需要の約 80% (生産額ベース) が自動車用部材であり<sup>1)</sup>, 世界的な競争力を維持している自動車産業にとって必要不可欠な産業分野である。近年の自動車に対する消費者のニーズは、自動車本来の走行・居住・積載性能の改善に留まらず、環境・エネルギー問題の解決, 安全装備の装着義務化および自動運転技術の開発, というように多岐に渡っている。例えば, 車体重量軽量化と衝突安全性を両立する観点から, ハイテン材と呼ばれる高張力鋼材の車体部材への適用が近年進められており, 引張強度 1000 MPa を超える素材が開発・採用されている。高強度素材の金属プレス加工に際しての主な問題点のひとつに金型摩耗に起因する金型寿命低減が挙げられる。金型摩耗による金型寿命低減および加工精度劣化については, 素材/金型間の摩擦摩耗により進行する物理現象であり, 金型への皮膜付加が有効な対策法のひとつとなる。これまでも金型表面への CVD や PVD による高硬度耐摩耗性皮膜が適用されてきたが, 上述のハイテン材のような高強度素材成形においては素材/金型間面圧が高くなり, 高硬度であるがじん性が低い従来皮膜ではクラックや剥離が発生するため, そこを起点としたかじりや焼付きを生じることが問題点として挙げられてきた<sup>2)</sup>。このような背景から, 耐摩耗性と高じん性を併せ持つ皮膜の開発は急務である。

これまでの研究成果において, 著者らが開発した「湿式めっき・ガス浸炭複合法」<sup>3)</sup>により形成した WC-Ni 硬質皮膜は, 汎用 WC-Co 超硬合金を上回る表面硬度および耐摩耗性を有し, なおかつスクラッチ試験においても皮膜剥離を生じない高じん性を併せ持つことを示してきた。また, この皮膜は成膜条件 (熱処理および浸炭条件) を調整することにより, 皮膜の WC 結晶の粒径や方位を変化させることが可能であるという特徴を有しているため, 加工対象に応じた硬さ-耐摩耗性のバランス制御が可能である。しかし, 当該皮膜の金型への適用に関してはまだ未検討のため, 現状では金型に適用した際の金型寿命向上効果に関する知見がない。

そこで本研究では, 以下の 3 点を達成することを目的として研究を遂行した。

1. プレスによる連続打抜き試験に基づき, 打ち抜きパンチに適用した WC-Ni 硬質皮膜の摩耗メカニズム, および皮膜微細構造と耐摩耗性との相関を把握すること。
2. 耐摩耗性を向上させる微細構造を得るための WC-Ni

硬質皮膜の成膜方法を確立し, それにより金型の長寿命化を達成すること。

3. 本 WC-Ni 硬質皮膜を, 大型かつ複雑形状の金型にも適用可能とすること。

## 2. 実験方法

### 2.1 試験片

図 1 にプレス加工の模式図を示す。プレス加工とは, 金型 (「雌型: ダイ」および「雄型: パンチ」からなる一対の加工用工具) に材料を固定し, 油圧プレスからパンチに荷重をかけ材料を塑性加工する加工法である。プレス加工には金属板などの素材から不要な部分を切断し切り抜く打抜き加工, 素材に圧をかけ目的に沿った形に曲げる曲げ加工, 素材を圧縮させて形を変える圧縮加工などがある。

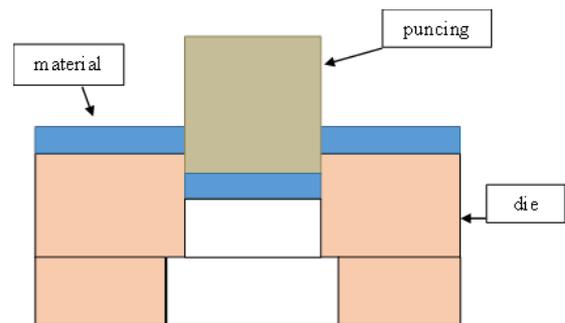


図 1 プレス加工の模式図

本研究では, 最も汎用的な打抜き加工パンチであるショルダーパンチを用いた連続打抜き試験による皮膜耐久性評価を実施するため, 市販のショルダーパンチ (株式会社ミスミ製 AL-SPAL10-60 P5) を基材として WC-Ni 硬質皮膜を施工した。本ショルダーパンチ基材の形状および寸法を図 2 に示す。本ショルダーパンチ基材鋼種である SKD11 は 11~13% の Cr が添加され, 硬い Cr 系炭化物を多量に晶出させて耐摩耗性を良くした鋼材であり, 冷間金型用鋼として広く用いられている。

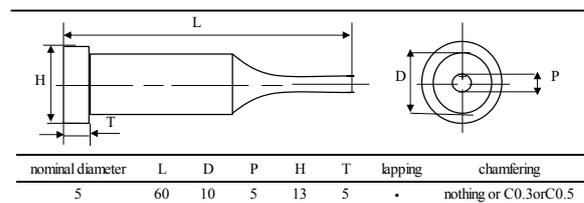


図 2 ショルダーパンチ基材の形状および寸法

WC-Ni 硬質皮膜施工時の剥離現象への影響を確認するため、上記ショルダーパンチのエッジ形状オプションとして「0.3mm または 0.5mm 面取りあり/なし」の両条件を試行した。また、先行研究で端面鏡面研磨が剥離防止に有効であることが判明したため、全ての試験片で端面鏡面研磨を行った。

著者らが開発した「湿式めっき・ガス浸炭複合法」に基づき、無電解 Ni-P めっきおよび電気 Ni-W めっきをショルダーパンチ基材に対して所定時間ずつ順次施工した。表 1 (a)(b)に、本研究での WC-Ni 硬質皮膜施工用の無電解 Ni-P めっきおよび電気 Ni-W めっきの浴組成およびめっき条件を示す。めっき施工後、還元性ガス (5% H<sub>2</sub>+Ar) 雰囲気中での結晶化熱処理、および浸炭性ガス (1.5% C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>+Ar) 雰囲気中でのガス浸炭処理を組み合わせた複合熱処理プロセスを付与した。

表 1 めっき浴組成およびめっき条件  
(a) 無電解 Ni-P めっき

Bath composition [mol/L]		Plating condition	
		Parameter	Value
NiSO <sub>4</sub> ·6H <sub>2</sub> O	0.068	Temperature	85 °C
NaPH <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ·H <sub>2</sub> O	0.210	Plating time	30 min
CH <sub>3</sub> COONa	0.090	pH	3.5~4.0
Citric acid	0.036		

(b) 電気 Ni-W めっき

Bath composition [mol/L]		Plating condition	
		Parameter	Value
NiSO <sub>4</sub> ·6H <sub>2</sub> O	0.048	Temperature	50 °C
Na <sub>2</sub> WO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O	0.208	Current density	10 A/dm <sup>2</sup>
Citric acid	0.256	Plating time	25 min
Ammonia water	8 ml	pH	6.5~7.0

## 2・2 試験方法

本研究では、連続打抜き試験用装置として油圧プレス機 AMADA 45t TP-450-X2 (株式会社アマダ) を使用し、作製した連続打抜き試験用試験片をパンチとして、それと合わせて準備したダイとともに装着した。被加工材としてバネ用ステンレス鋼 SUS304 (調質 3/4H、厚さ 1 mm) を選択し、打抜き速度 125 回/分で連続打抜きを実施した。所定回数の打抜き毎に打抜き欠落部のバリ高さを測定し、一定の高さを超えたら皮膜剥離とみなし試験を終了した。試験終了までの打抜き回数を本連続打抜き試験用試験片の耐久性とした。図 3 に試験装置外観を、表 2 に連続打抜き試験条件を示す。

表 2 連続打抜き試験条件

Machine	AMADA 45t TP-450-X2
Material	SUS304 3/4H t1.0×10
Punching rate [spm]	125
Pless work oil	G-3060M
Press pressure [kN]	450



図 3 連続打抜き試験用装置外観

## 3. 試験結果および考察

### 3・1 めっき施工後および熱処理後の皮膜損傷対策

本研究で施工する WC-Ni 硬質皮膜は、当初は平板基材上への施工を前提として開発されたものであり、その後に円板基材上への施工も可能なことが確認されたことでその基材形状選択性が拡張された。しかし、丸棒基材の端面近傍領域 (端面、および端面から一定距離内の側面) への施工は本検討が初めての取り組みであった。これまでの基材形状 (平板および円板) には存在しなかった、端面から側面につながるエッジ領域に対する皮膜施工は、めっき成膜時にめっき膜中に導入される残留応力、およびガス浸炭中の WC 形成に伴う内部応力発生が、基材形状に起因する応力集中により更に顕在化することが予想された。実際、平板基材では施工後に皮膜損傷が生じなかった硬質皮膜施工条件において、剥離やき裂発生といった皮膜損傷が頻繁に発生したため、申請研究期間のかなりの割合を施工時の皮膜損傷対策に費やさざるを得なくなった。以下に、具体的に実施した皮膜損傷対策を列記した。

- ・ 基材形状変更 (端面端部の面取り加工)
  - ・ 基材側面のめっき施工範囲調整
  - ・ 電気 Ni-W めっき施工時のホットスターラー回転数調整
  - ・ 電気 Ni-W めっき中の丸棒基材保持位置調整
  - ・ 電気 Ni-W めっき中の Ni 電極-基材端面間距離
  - ・ 無電解 Ni-P めっきおよび電気 Ni-W めっきのめっき時間調整
  - ・ 無電解 Ni-P めっきおよび電気 Ni-W めっきの錯化剤変更とそれに伴うめっき液 pH 調整
- これらの試行結果から、丸棒基材に対する WC-Ni 硬質皮膜施工条件を確立した。以下に、WC-Ni 硬質皮膜施工における共通条件を記す。
- ・ 基材側面めっき施工範囲：端面より 3mm の範囲
  - ・ ホットスターラー回転数：400rpm
  - ・ 丸棒基材保持位置：電気 Ni-W めっき浴液面から深さ方向における中央位置
  - ・ Ni 電極-基材端面間距離：35mm
  - ・ 電気 Ni-W めっきの錯化剤およびめっき液 pH：クエン酸・pH=6.5~7.0

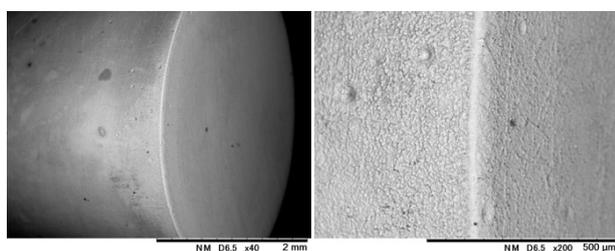
そして本研究では、共通条件以外で個別の条件を変化させた3種の試験片を作製し、連続打抜き試験用試験片として使用した。表3に連続打抜き試験用試験片の仕様を示す。

表3 連続打抜き試験用試験片仕様

Specimen	Plating process	Heat treatment		Chamfering
		Crystallization	Gas carburization	
shoulder punche -1	Electroless Ni-P 60min Electro Ni-W 25min	650°C-60min in 5%H <sub>2</sub> +Ar	900°C-10min in 1.5%C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> +Ar	—
shoulder punche -2	Electroless Ni-P 30min Electro Ni-W 60min	650°C-30min in 5%H <sub>2</sub> +Ar	850°C-10min in 1.5%C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> +Ar	C 0.5
shoulder punche -3	Electroless Ni-P 60min Electro Ni-W 45min	↑	850°C-30min in 1.5%C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> +Ar	C 0.3

### 3・2 ショルダーパンチ試験片-1 による連続打ち抜き試験結果

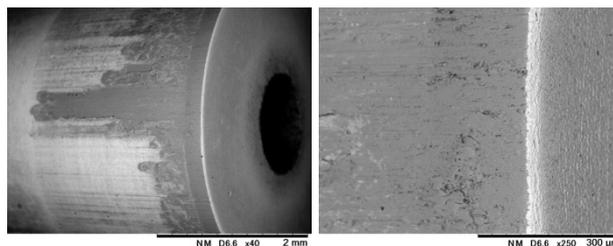
ショルダーパンチ試験片-1は、当研究室内の先行研究における平板基材への標準施工条件を適用して作製した。試験前の試験片エッジ部のSEM観察画像を図4(a)(b)に示す。WC-Ni硬質皮膜が損傷なく施工されていることが分かる。



(a) 40倍 (b) 200倍

図4 ショルダーパンチ試験片-1 試験前観察

ショルダーパンチ試験片-1を試験装置に装着し、表2に示す試験条件で連続打抜き試験を開始したところ、打抜き回数1000回経過時点で打抜き欠落部のバリ高さの増加が確認された。ただ、これが初回の連続打抜き試験だったこともあり、とりあえず連続打抜き試験を継続したところ、打抜き回数6000回経過時点で一転してバリ高さの低下が確認された。またワークの状態変化も合わせて確認された。更に試験を続行したところ、打抜き回数12500回経過時点で明らかにバリの状態に変化が見られたため試験を中断し、パンチを取り外して目視でパンチの状態を確認したところ、WC-Ni硬質皮膜に変化が見られた。試験後の試験片エッジ部のSEM観察画像を図5(a)(b)に示す。試験片端面および側面において、WC-Ni硬質皮膜の損耗・消失が見られた。また上述の試験中バリ高さの推移から、本試験片における試験終了までの打抜き回数(皮膜耐久性)を「1000回」と評価した。

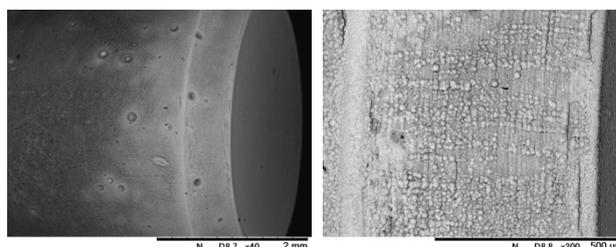


(a) 40倍 (b) 250倍

図5 ショルダーパンチ試験片-1 試験後観察

### 3・3 ショルダーパンチ試験片-2 による連続打ち抜き試験結果

ショルダーパンチ試験片-2では、前述のショルダーパンチ試験片-1においてWC-Ni硬質皮膜の早期の損耗を生じたことから、硬質層の厚膜化を意図しためつき条件変更を行なった。試験前の試験片エッジ部のSEM観察画像を図6(a)(b)に示す。



(a) 40倍 (b) 200倍

図6 ショルダーパンチ試験片-2 試験前観察

なおこの試験片においてはエッジ部C0.5面取り有基材に対してWC-Ni硬質皮膜を施工したが、試験片端面を平面研削することで面取り部を除去した後に連続打抜き試験を実施した。

ショルダーパンチ試験片-2を試験装置に装着し、表2に示す試験条件で連続打抜き試験を開始したところ、打抜き回数500回経過時点で打抜き欠落部のバリ高さの増加が確認されたため試験を中断し、パンチを取り外して目視でパンチの状態を確認したところ、ショルダーパンチ試験片-1と同様のWC-Ni硬質皮膜損耗・消失が見られたため、本試験片の皮膜耐久性を「500回」と評価した。

### 3・4 ショルダーパンチ試験片-3 による連続打ち抜き試験結果

ショルダーパンチ試験片-2における、ショルダーパンチ試験片-1よりさらに早期の皮膜損耗原因として、硬質層厚膜化によって表面と比較してWC結晶形成量が少ない低強度領域が硬質層内部において存在し、連続打抜き試験のせん断負荷によりそこが優先的に塑性流動してしまったことが考えられた。そこでショルダーパンチ試験片-3においては、電気Ni-Wめつき膜厚を試験片-2から低減するとともに、WC結晶形成量の増加を意図してガス浸炭時間を

30分に延伸した。まためっき施工後の皮膜損傷対策が進んだことから、基材エッジ部面取りをC0.5からC0.3に変更し、試験片-2と同様に連続打抜き試験前に面取り部を除去した。試験前の試験片エッジ部のSEM観察画像を図7(a)(b)に示す。

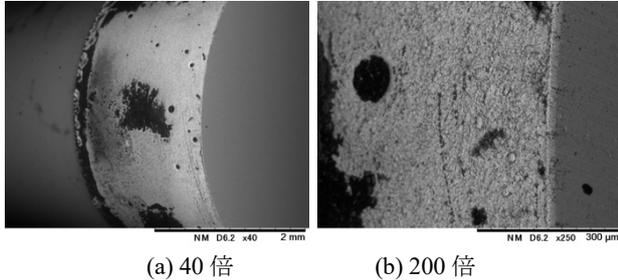


図7 ショルダーパンチ試験片-3 試験前観察

ショルダーパンチ試験片-3を試験装置に装着し、表2に示す試験条件で連続打抜き試験を開始したところ、打抜き回数100回経過時点で打抜き欠落部のバリ高さが2倍に増加したため試験を中断した。図8(a)~(d)に示した試験後の試験片エッジ部のSEM観察画像から、皮膜の小規模な損耗や部分的欠落が見られたことも考慮して、本試験片の皮膜耐久性を「100回」と評価した。

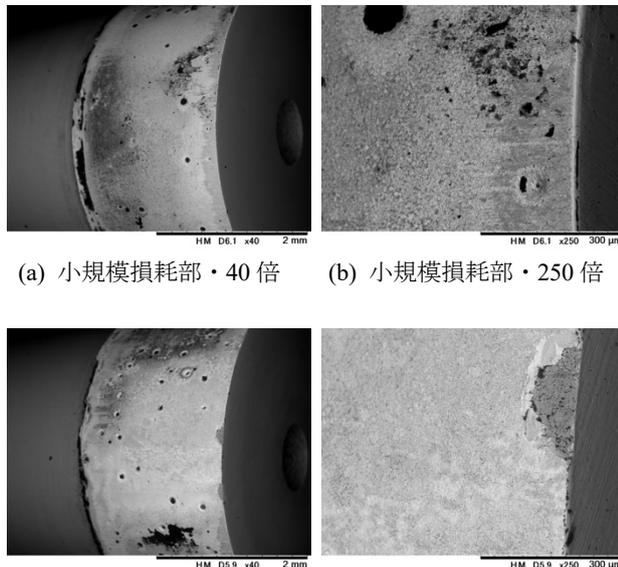


図8 ショルダーパンチ試験片-3 試験後観察

### 3.5 本研究のまとめ

表4に連続打ち抜き試験結果(皮膜耐久性)をまとめて示す。本研究で作製した3種のショルダーパンチ試験片においては、目的とした金型の長寿命化を達成することはできなかった。その原因として、皮膜硬度を担保するWC結晶形成量の不足とともに、WC結晶を保持するFe-Ni母相の強度不足と推察される。また試験片-3においては、これ

まで見られなかった硬質皮膜の部分的欠落が確認された。これは、基材面取り部除去のため端面の平面研削を行なったことにより、側面皮膜に連続打抜き試験のせん断負荷が直接作用したためと考えられる。

表4 連続打抜き試験結果

specimen	Number of punching
shoulder punche -1	1000
shoulder punche -2	500
shoulder punche -3	100

本研究で得られた上述の知見に基づき、連続打抜き試験に適用するWC-Ni硬質皮膜における今後の施工指針として以下の各項目を得た。

- WC結晶の形成量および配向の制御:連続打抜き試験によるせん断負荷への耐久性向上
- 硬質層膜厚の最適化:同上
- Fe-Ni母相の強度向上:同上
- めっき時残留応力およびガス浸炭時内部応力の低減:皮膜剥離防止(=面取り無基材での施工可能性向上)

## 4. 結言

湿式めっき・ガス浸炭複合法により施工されるWC-Ni硬質皮膜の、プレスせん断金型への適用による金型長寿命化を主たる目的として研究を行った結果、以下の結論を得た。

- (1) 連続打抜き試験用試験片基材であるSKD11ショルダーパンチに対するWC-Ni硬質皮膜の施工条件を探索した結果、めっき施工後および熱処理後での剥離発生を抑制可能な皮膜施工条件を確立した。
- (2) 上記の皮膜施工条件を適用し施工したWC-Ni硬質皮膜付加ショルダーパンチ試験片を用いた連続打抜き試験を実施した結果、目的とした金型長寿命化は達成できなかったが、連続打抜き試験に適用するWC-Ni硬質皮膜における今後の施工指針を得た。

## 謝辞

本研究は、公益財団法人天田財団からの一般研究開発助成(AF-2021007-B2)により実施した研究に基づいていることを付記するとともに、同財団に感謝致します。

## 参考文献

- 1) 新素材産業ビジョン, (一社) 素材センター, 2013年3月
- 2) 型技術, [特集] 欧州の金型・成形技術動向, 日刊工業新聞社, 2019年3月
- 3) 高硬度・耐磨耗性部材および高硬度・耐磨耗性部材の製造方法, 特願 2020-187486