

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 5 月 31 日現在

機関番号：12608

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2010～2011

課題番号：22656163

研究課題名（和文）超高速コーティング援用無潤滑精密プレス加工法の開発

研究課題名（英文）Development of dry precision punching process utilizing rapid surface coating

研究代表者 大竹 尚登 (OHTAKE NAOTO)

東京工業大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：40213756

研究成果の概要（和文）：サーボプレスによる創形加工に大気圧プラズマ CVD による超高速コーティングを導入することにより，無潤滑精密加工法を構築することを目的とし，パルスプラズマによる大気圧下での超高速 DLC コーティング法を開発して，工具に用いることの出来る，水素量 27atm.%以下，硬さ 10GPa 以上の DLC 膜の作製条件を導出し，実際に PW（プレスワーキング）パンチにコーティングを行った。そして，DLC コーティングによりアルミニウム加工材のパンチへの焼き付きを防止して抜き荷重を安定化できることを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：This research aims development of dry and precision punching process utilizing rapid Diamond-like carbon (DLC) coating. DLC coating was performed at atmospheric pressure by nano-pulse plasma chemical vapor deposition method. DLC films deposited contain less than 27 atm.% of hydrogen and exhibits larger than 10 GPa in nano-indentation hardness. Coating process was applied to punching process and we found that punching force was stabilized by DLC coatings because DLC coating prevent from adhesion of aluminum work piece on punch surface.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	2,300,000	0	2,300,000
2011 年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,200,000	270,000	3,470,000

研究分野：材料工学

科研費の分科・細目：材料加工・処理

キーワード：(1) 塑性加工 (2) プラズマ (3) コーティング (4) パルス放電 (5) 打ち抜き

1. 研究開始当初の背景

Cool Earth50 が国策となり，CO₂ 排出量を 1990 年比で 25%削減する必要がある環境下で，ものづくりは環境に調和しつつ高精度・低コストプロセスに進化する必要がある。特に塑性加工を主とする創形加工においては，①工具寿命の延長，②高精度・高品質化，

③潤滑剤の使用量低減，④タクトタイムの短縮が将来のキー技術になる（経済産業省技術戦略マップ 2008，塑性加工学会年間展望：塑性と加工(2009)689-699）。科学技術的観点からみると，大気圧下で 1 回の加工毎にコーティングする超高速薄膜成長例はこれまでに無く，プラズマ物理化学，薄膜工学，塑性

工学の異分野の叢智を結集し、極短パルス放電技術 1) を駆使して 1 秒以下のタクトタイムでコーティングを為すことは学問的に大いに興味のあるところで、本研究を申請する大きい動機である。

2. 研究の目的

本研究は、サーボプレスによる創形加工に大気圧プラズマ CVD による超高速コーティングを導入することにより、無潤滑精密加工法を構築することを目的とするものである。そのために、

(1) 極短パルス放電技術を駆使して大気圧下で炭化水素のプラズマを制御し、短時間内で金型・工具表面に DLC 膜をコーティングする技術を開発すること、(2) 100nm/s 以上の超高速コーティングにおけるプラズマ計測を行い、合成機構を検討すること、(3) 創形加工に DLC 膜のインラインコーティングプロセスを導入し、プレスとコーティングのハイブリッド加工装置を開発すること、(4) 打抜き加工を対象として、工具摩耗と DLC 膜のコーティング速度をインラインで測定し、コーティング速度を制御することで、ゼロ工具摩耗無潤滑加工を実現することを研究目標とする。

3. 研究の方法

本研究は、大気圧下でのダイヤモンド状炭素膜の生成過程を理解して無潤滑精密加工を実現するもので、①パルスプラズマを用いて大気圧下で超高速コーティング法を開発すること②最大の電子密度・電子温度と平均の電子密度・電子温度を変化させて合成を行い、膜特性および合成速度との関連を明らかにするとともに発光分光分析を行い、ダイヤモンド状炭素膜生成の基礎過程を理解すること、③プレス・コーティングハイブリッド加工装置を開発すること、④ゼロ工具摩耗無潤滑プレス加工の試みからなる 4 ステップで成り立ち、以下のような研究計画・方法を行った。

(1)パルスプラズマによる大気圧下での超高速 DLC コーティング法の開発

極短パルス電源を用いて、大気圧下で炭化水素系のプラズマを発生させて、短時間で鉄鋼材料表面に耐摩耗性膜をコーティングする装置を開発する。DLC の合成にはイオンが必要なため、200V/ns 以上の極めて高い電圧の立ち上がりを有する極短パルス電源を用い、大量のイオンを生成させて、10kV 以上の電圧を印加して鉄鋼材料上に DLC 膜を合成する。電流としては約 100Ap が必要と見積られるので、これらの条件を基に極短パルス電源を開発する。そして、ヘリウムの準安定状態を利用してメタンガスを分解・イオン化することを実施する。

(2)超高速 DLC 堆積基礎過程の検討

パルスの特徴を生かして、最大の電子密度・電子温度と平均の電子密度・電子温度を変化させて合成を行い、まず DLC の合成を成功させた後に、生成膜の結晶学的特性・機械的特性および合成速度との関連を明らかにする。さらに時間分解能の高い発光分光分析により、プラズマ中の化学種の種類・平衡濃度の時間変化を把握することにより本合成法における DLC 生成の基礎過程を理解して、成長速度を向上させるにはどのような化学種が必要なのか、単一パルス波形および周波数が生成 DLC 膜の結晶学的特性及び機械的特性にどのような影響を及ぼすかについて検討を行う。そして、工具に用いることの出来る、水素量 27atm.%以下、硬さ 10GPa 以上の DLC 膜の作製条件を導出する。

(3)プレス・コーティングハイブリッド加工装置の開発および加工実験

開発した大気圧超高速コーティング法をプレス加工機に搭載し、精密打抜きパンチ表面をクリーニングし、その後ダイヤモンド状炭素 (DLC) 膜をコーティングするハイブリッド加工装置を開発する。打ち抜き前には放電は生じない。打抜き後にパンチが上がった状態のところ、DLC の超高速成膜を実施する。具体的にはパンチの平行部に He をキャリアガスとして原料ガスを流入させ、パンチと円盤状対向電極との間で極短パルス放電プラズマを発生させて、パンチ平行部に DLC を合成する。金型は局部排気システムの内部に導入されている。前述(1)、(2)の成果を基に打抜き速度に同期するコーティングの実現を目標とする。

さらにゼロ工具摩耗無潤滑創形加工を試み、ハイブリッド加工装置を用いて実際に精密せん断加工を行う。DLC は耐アルミニウム凝着性に優れているので、アルミのパンチへの焼付きを抑止し、最終的にはゼロ工具摩耗を実現しつつ、精密創形加工を連続的に可能とする。

4. 研究成果

(1)パルスプラズマによる大気圧下での超高速 DLC コーティング法の開発

240V/ns の立ち上がりを有する極短パルス電源 (ナノパルス電源) を導入し、大気圧下および準大気圧下で炭化水素系のプラズマを発生させてパンチに DLC コーティングを行う装置を開発した。実験条件を表 1 に示す。合成圧力を 500 Torr、入力一次電圧を 30V、に固定して合成実験を行った。極短時間における膜合成を確認するため、電圧印加時間は 0.5 秒から 10 秒までという極めて短い時間での合成を行った。電極の先端にはステンレス製メッシュを施し、放電を均一化すると共にアーク放電への遷移を抑制した。

表 1 成膜条件

Pressure	500 Torr
Input Voltage	30V
CH ₄ Flow Rate	1.0 slm
He Flow Rate	30 slm
Substrate	Si
electrode distance	1mm
Deposition Time	0.5, 1, 2, 3, 5, 10 sec

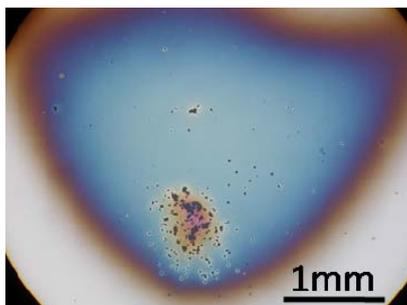
その結果、0.5 秒、1 秒、2 秒の合成（電力投入）では膜の存在は確認できなかった。3 秒の合成（放電）ではうっすらながらも黄色の膜の付着が確認され、5 秒、10 秒と合成時間



(a) 成膜時間 3 秒



(b) 成膜時間 5 秒



(c) 成膜時間 10 秒

図 1 短時間成膜時の生成膜

が長くなるに従って膜の色も濃くなっている。3 秒、5 秒、10 秒で合成した膜の光学顕微鏡で観察した写真を図 1 に示す。3 秒から 10 秒にかけて徐々にはっきりとした膜が付着している様子が確認できる。

極短時間で合成した膜をラマン散乱分光で分析した。測定には日本分光製のレーザーラマン分光器 NRS-1000 を用いた。得られたラマンスペクトルを図 2 に示す。スペクトルは D バンドと G バンドからなるブロードなピークとなっており、光学顕微鏡で観察することのできた薄膜は DLC であるということが確認された。ラマン散乱分光分析においても光学顕微鏡での観察結果と同様に 3 秒以上の合成条件において DLC 特有のピークが得られており、逆に 2 秒以下の合成時間ではピークを観測することはできなかった。

通常の DLC の合成時間が 10 分～120 分程度である為、今回の実験で得られた「3 秒で DLC が合成される」という結果は、超高速コーティングを実現した点で、プレスへの応用の観点に限らず非常に興味深い結果であるといえる。2 秒以下で膜及びそのピークが観測できなかった理由としては、電圧印加時間と放電開始時間は必ずしも一致せず、電圧印加から放電開始まで数秒のタイムラグが生じていた可能性が考えられる。これにより電圧印加時間が 0.5～2 秒間だったにも関わらず、放電が起きてプラズマが発生した時間は極めて短時間だったと考えられる。「火花電圧は気体の圧力と電極間隔の積で決まり、極小値を持つ」というパッシェンの法則からも分かる通り、圧力が高くなれば高くなるほど放電は生じにくくなる。本実験は 500 Torr という高圧力で実験が行われた為この様な「放電が起こらない」という現象が起きていた可能性がある。

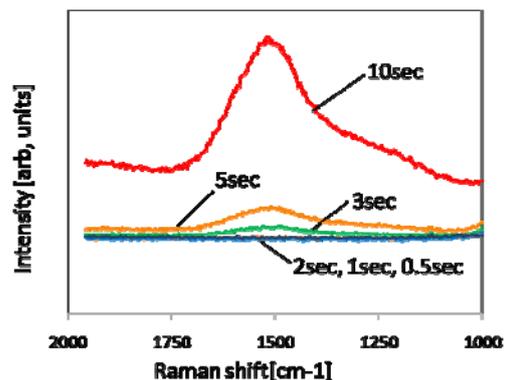


図 2 各成膜時間で合成された膜のラマンスペクトル

(2) 超高速 DLC 堆積基礎過程の検討

ラングミュアプローブによる電子温度と電子密度の検討は、Ar ガスを用いて行った。

その結果、平均の電子温度は 0.3eV 程度と低いですが、パルス印加時は 10.5eV 以上と瞬間的に極めて高い電子温度になっており、イオン発生を可能にしていることがわかった。さらに、 CH_4 を原料ガスして放電した際の時間分解能の高い発光分光分析により、パルス印加時に CH と H のピークが DLC 生成し、パルス off とともにそれらの発光は急激に減少していることがわかった。

(3) プレス・コーティングハイブリッド加工装置の開発および加工実験

開発した大気圧超高速コーティング法をプレス加工機に搭載し、精密打抜きパンチ表面をクリーニングし、その後ダイヤモンド状炭素 (DLC) 膜をコーティングするハイブリッド加工装置を開発した。そのシステムの概略を図 3 に示す。中央図の右側は打抜き時を示しており、このとき放電は生じない。打抜き後に同図中央左側のパンチが上がった状態のところで、DLC の超高速成膜を実施する。具体的にはパンチの平行部に He をキャリアガスとして原料ガスを流入させ、パンチと円盤状対向電極との間で極短パルス放電プラズマを発生させて、パンチ平行部に DLC を合成する。パンチの形状を図 4 に示す。プレスワーキングパンチを採用している。

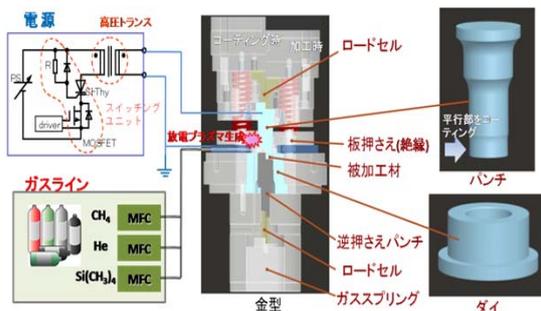


図 3 精密打抜きに大気圧超高速 DLC コーティングユニットを組み込んだハイブリッド創形加工装置の概略図。金型は、本研究費で購入したサーボプレスに搭載されている。

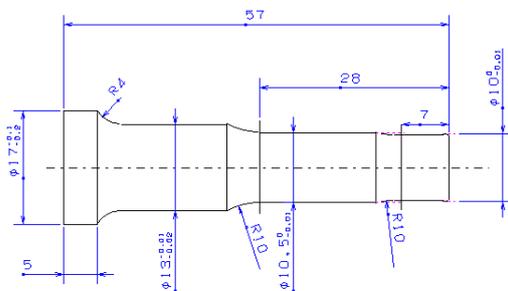
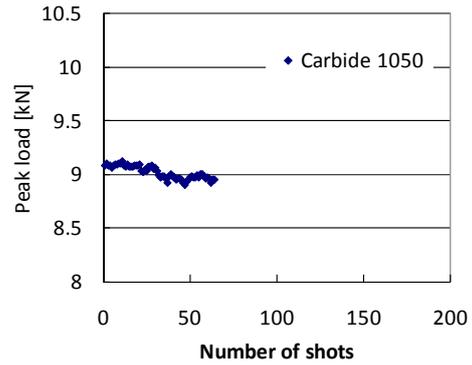
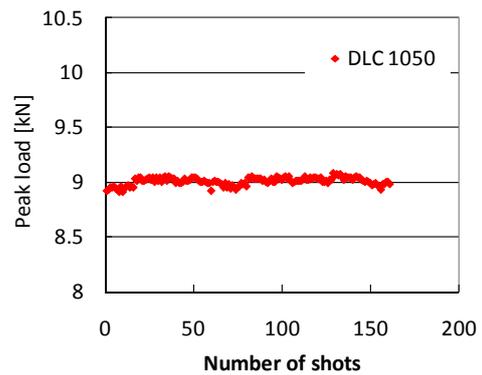


図 4 プレスに用いたパンチの形状



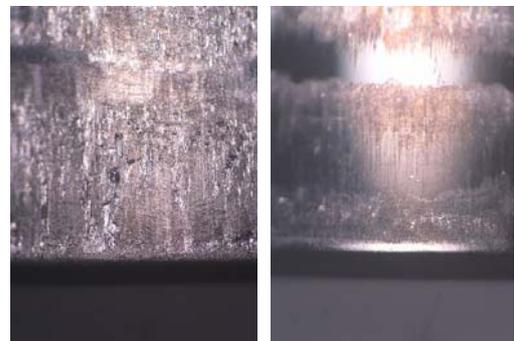
(a)DLC コーティングなしの超硬パンチ



(b)DLC コーティングした超硬パンチ

図 5 打抜き加重の変化

図 5 に、A1050 アルミ材の打抜きを行った際のプレス荷重変化を示す。(a)DLC コーティングなしの超硬パンチと (b)DLC コーティングした超硬パンチの場合で、大きい荷重の差異はみられないが、(a)の DLC コーティングしていない場合には約 70 回で焼き付きが生じ、パンチとワークが固着してしまったことから、実験を中止した。これに対して、DLC コーティングを行うことで、160 回まで加工を行っても荷重が安定していた。



(a) DLC なし 32 穴 (b)DLC コーティング 160 穴

図 6 加工後のパンチ表面の顕微鏡写真

図6に、A1050加工後のパンチ先端部の観察写真を示す。DLCコーティング施さない超合金パンチの場合、(a)に示すように全面にアルミニウムが焼き付いている。荷重が増加しなかったのは校正刃先と同じ状態で、付着したアルミニウムにより加工が行われていたからであり、前述したようにこの観察後20穴程度でパンチとワークが固着を生じてしまっている。それに対して、DLCコーティングを適用した場合には、160穴の加工後にもほとんど焼き付きがみられず、図5で打抜き荷重が安定している理由がDLCコーティングによるものであることがわかった。

以上のように、本研究で提案したプロセスによりアルミニウムの焼き付きを防止して、無潤滑で安定した加工の可能なことを明らかにした。

(4)まとめ

ナノパルスプラズマCVD法により、5秒の合成時間でDLC膜を形成できることを明らかにした。この際の電子温度は、平均では0.3eVと低いが、パルス印加時には10eVを超え、原料ガスのイオン化に十分なエネルギーを有していることがわかった。そして、開発した大気圧超高速コーティング法をプレス加工機に搭載し、ダイヤモンド状炭素(DLC)膜をコーティングするハイブリッド加工装置を開発し、打抜き実験を行った結果、DLCコーティングによりアルミニウムの焼き付きが抑制でき、安定した加工荷重で長寿命の加工が出来ることを明らかにした。

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1件)

① 大竹尚登、ナノパルスプラズマCVDによる大気圧下でのダイヤモンド状炭素膜の合成、セラミックス、査読なし、46(2011)570-575

[学会発表] (計1件)

① Toshiharu Hirama, Nao Miyatake, Naoto Ohtake, Development of DLC Coating Applied Dry Press Working Process, The 15th International Conference on Thin Films, (2011.11.9, Kyoto)

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

ホームページ等

なし

6. 研究組織

(1)研究代表者 大竹 尚登
(OHTAKE NAOTO)

東京工業大学・大学院理工学研究科・教授
研究者番号：40213756

(2)研究分担者 なし
()

研究者番号：

(3)連携研究者 なし
()

研究者番号：