

氏名（本籍）	窪田 寛之（岐阜県）		
学位の種類	博士（工学）		
学位授与番号	甲第 312 号		
学位授与日付	平成 19 年 3 月 25 日		
専攻	生産開発システム工学専攻		
学位論文題目	高張力鋼板のドライ成形における DLC 被膜のトライボ特性 (Tribo-performance of DLC Coated Die in Dry Forming Process of High Tensile Strength Steel Sheet)		
学位論文審査委員	(主査) 教授 岡村 政明 (副査) 教授 戸梶 恵郎 教授 服部 敏雄 教授 王 志剛		

論文内容の要旨

塑性加工において潤滑剤は、摩擦力の低減、焼付きの抑制、金型摩耗の抑制のために一般に使用されている。しかし、近年の地球環境に対する意識の高揚から、潤滑剤を極力使わないセミドライ加工もしくは全く使わないドライ加工の実現が望まれている。一方、高張力鋼板に代表される高強度鋼板は、自動車の車両重量の低減と車体剛性の向上という相反する要求を満足するために使用率が増加している。ドライ加工への要求に加え、材料の高強度化により成形における金型と被加工材の摩擦条件はより厳しいものとなっており、従来潤滑剤の担ってきた役割を工具材の工夫により実現することが必要不可欠であると考えられる。そこで注目されているのが DLC (Diamond-like Carbon) 被膜である。DLC 被膜は一般に、高い硬度を有し、化学的に安定であること、また、表面の平滑性が高いことから、潤滑剤に代わってその役割を果たすことができると考えられている。

本研究は DLC 被膜による高張力鋼板のドライ成形における摩擦特性、耐焼付き性および被膜損傷挙動を明らかにし、DLC 被膜による高張力鋼板のドライ成形の実用性を明らかにすることを目的とした。

高張力鋼板の成形に利用される主な加工法として、しごき加工および深絞り加工が挙げられる。しごき加工は板材成形の中でも工具に加わる面圧が比較的高いという特徴がある。また、深絞り加工は、工具面圧はしごき加工に比べて低いものの、工具面上を被加工材が滑る距離が比較的に長いという特徴がある。しごき加工に関しては、摩擦係数が測定可能な帯板しごき形摩擦試験機を用い、しごき距離の増加に伴う摩擦係数の変化、加工後の工具表面性状を検討した。その結果、潤滑油を併用した各種硬質被膜によるしごき加工では摩擦係数の増加および工具面への焼付きが生じた比較的に広範囲な加工条件において、DLC 被膜はドライ加工にもかかわらず低い摩擦係数を示すとともに、良好な耐焼付き能を示すことがわかった。さらに、耐久性の観点から DLC 被膜の耐アブレイシブ性について検討を加えた。摩擦界面に各種硬質粒子を介在させ、DLC 被膜の損傷に及ぼす影響を調べた結

果、通常の工場雰囲気において加工工程への侵入が最も懸念される砂に対しては、良好な耐アブレイシブ性を示すことがわかった。

深絞り加工に関しては、材料変形の面から摩擦条件が比較的厳しい角筒深絞りについて検討した。硬質被膜を被覆していない各種工具材料を用いて、角筒深絞りにおける焼付き現象のマクロ観察を行い、焼付きの発生および成長過程を明らかにした。すなわち、ダイス表面にはわずかに数回の加工において焼付きが発生し、発生部位は最も高面圧が作用するダイ肩 R 部ではなく、その部位より数ミリ下がった位置で直辺部と曲辺部の境界付近であり、加工回数とともに上方へ成長していく。DLC 被膜を除く各種硬質被膜を被覆した工具においては、100 回もしくはそれ以上の加工でもダイス表面に顕著な焼付きは生じないものの、無被覆の場合に焼付きが観察された位置に比較的小さな凝着がみられた。一方、DLC 被膜では 1000 回以上もの加工においてもダイス表面にはミクロ凝着さえ観察されず、良好な耐焼付き能を示すことがわかった。しかし、ダイ肩 R 部には高面圧負荷に起因する被膜剥離が認められた。

DLC 被膜はしごき加工および深絞り加工において良好なトライボ特性を示し、ドライ加工の金型材料としての実用性を有することがわかった。しかし、高面圧負荷を受ける部位において被膜剥離を生じることから、そのような状況下における DLC 被膜の損傷挙動を検討した。被膜に高面圧負荷を与える方法としてビッカース硬さ試験法を用い、負荷荷重の増加に伴う圧痕形態の変化および被膜内部の損傷状態を検討した結果、被膜表面から観察できる被膜損傷から圧痕形態は主に 4 つに分類できること、また、被膜表面からの観察においてクラックなどの損傷がみられない比較的低い負荷荷重においても、被膜内部では表面に平行なクラックが生じていることがわかった。被膜内部におけるクラックの発生形態は基材材質や膜厚に依存せず、DLC 被膜内の圧縮残留応力による除荷時の被膜の戻り変形に大きく左右されることがわかった。

論文審査結果の要旨

塑性加工において潤滑剤は、摩擦力の低減、焼付きの抑制、金型摩耗の抑制のために一般に使用されている。しかし、近年の地球環境に対する意識の高揚から、潤滑剤を極力使わないセミドライ加工もしくは全く使わないドライ加工の実現が望まれている。一方、高張力鋼板に代表される高強度鋼板は、自動車の車両重量の低減と車体剛性の向上という相反する要求を満足するために使用率が増加している。ドライ加工への要求に加え、材料の高強度化により成形における金型と被加工材の摩擦条件はより厳しいものとなっており、従来潤滑剤の担ってきた役割を工具材の工夫により実現することが必要不可欠であると考えられる。そこで注目されているのが DLC (Diamond-like Carbon) 被膜である。DLC 被膜は一般に、高い硬度を有し、化学的に安定であること、また、表面の平滑性が高いことから、潤滑剤に代わってその役割を果たすことができると考えられている。

本研究は DLC 被膜による高張力鋼板のドライ成形における摩擦特性、耐焼付き性および被膜損傷挙動を明らかにし、DLC 被膜による高張力鋼板のドライ成形の実用性を明らか

にすることを目的とした。

高張力鋼板の成形に利用される主な加工法として、しごき加工および深絞り加工が挙げられる。しごき加工は板材成形の中でも工具に加わる面圧が比較的高いという特徴がある。また、深絞り加工は、工具面圧はしごき加工に比べて低いものの、工具面上を被加工材が滑る距離が比較的に長いという特徴がある。しごき加工に関しては、摩擦係数が測定可能な帯板しごき形摩擦試験機を用い、しごき距離の増加に伴う摩擦係数の変化、加工後の工具表面性状を検討した。その結果、潤滑油を併用した各種硬質被膜によるしごき加工では摩擦係数の増加および工具面への焼付きが生じた比較的広範囲な加工条件において、DLC被膜はドライ加工にもかかわらず低い摩擦係数を示すとともに、良好な耐焼付き能を示すことがわかった。さらに、耐久性の観点から DLC 被膜の耐アブレイシブ性について検討を加えた。摩擦界面に各種硬質粒子を介在させ、DLC 被膜の損傷に及ぼす影響を調べた結果、通常の工場雰囲気において加工工程への侵入が最も懸念される砂に対しては、良好な耐アブレイシブ性を示すことがわかった。

深絞り加工に関しては、材料変形の面から摩擦条件が比較的に厳しい角筒深絞りについて検討した。硬質被膜を被覆していない各種工具材料を用いて、角筒深絞りにおける焼付き現象のマクロ観察を行い、焼付きの発生および成長過程を明らかにした。すなわち、ダイス表面にはわずかに数回の加工において焼付きが発生し、発生部位は最も高面圧が作用するダイ肩 R 部ではなく、その部位より数ミリ下がった位置で直辺部と曲辺部の境界付近であり、加工回数とともに上方へ成長していく。DLC 被膜を除く各種硬質被膜を被覆した工具においては、100 回もしくはそれ以上の加工でもダイス表面に顕著な焼付きは生じないものの、無被覆の場合に焼付きが観察された位置に比較的に小さな凝着がみられた。一方、DLC 被膜では 1000 回以上もの加工においてもダイス表面にはミクロ凝着さえ観察されず、良好な耐焼付き能を示すことがわかった。しかし、ダイ肩 R 部には高面圧負荷に起因する被膜剥離が認められた。

DLC 被膜はしごき加工および深絞り加工において良好なトライボ特性を示し、ドライ加工の金型材料としての実用性を有することがわかった。しかし、高面圧負荷を受ける部位において被膜剥離を生じることから、そのような状況下における DLC 被膜の損傷挙動を検討した。被膜に高面圧負荷を与える方法としてビッカース硬さ試験法を用い、負荷荷重の増加に伴う圧痕形態の変化および被膜内部の損傷状態を検討した結果、被膜表面から観察できる被膜損傷から圧痕形態は主に 4 つに分類できること、また、被膜表面からの観察においてクラックなどの損傷がみられない比較的に低い負荷荷重においても、被膜内部では表面に平行なクラックが生じていることがわかった。被膜内部におけるクラックの発生形態は基材材質や膜厚に依存せず、DLC 被膜内の圧縮残留応力による除荷時の被膜の戻り変形に大きく左右されることがわかった。

本研究は、DLC 被膜による高張力鋼板のドライ成形の実用性を検討したものであり、しごき加工、角筒絞り加工における DLC 被膜の摩擦特性、耐焼付き性および耐久性について貴重なデータを提供すると同時に、DLC 被膜は従来の各種硬質被膜に潤滑剤が併用した

場合と同等以上の性能を有することを示している。さらに、高面圧負荷による被膜剥離挙動をビッカース硬さ試験法を用いて検討し、剥離の発生機構を明らかにしている。これらの成果は学術的、工学的に優れており、学位論文に値するものであると判定された。

最 終 試 験 結 果 の 要 旨

学位論文の内容および関連する専門分野に関する口頭試問を行った結果、学位申請者は学位授与に相応した高い学力を有することが認められたので、最終試験を合格と判定した。