

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 9 日現在

機関番号：32644

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560136

研究課題名(和文) ホウ素含有薄膜の高温潤滑性能を利用した航空機用 Ti 合金の高効率加工に関する研究

研究課題名(英文) Study of machining Ti alloy for airplanes with high efficiency by using boron containing thin films with lubricious properties at high temperatures

研究代表者

神崎 昌郎 (KOHZAKI, Masao)

東海大学・工学部・教授

研究者番号：20366024

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000 円、(間接経費) 1,230,000 円

研究成果の概要(和文)：本研究においては、高温潤滑性付与による工具表面の高性能化を通して Ti 合金の高速加工・ドライ加工実現を目指した。具体的には、ホウ素含有薄膜(TiB₂を出発原料とする TiB₂系薄膜)中のホウ素および酸素含有量を制御することにより、高温潤滑性能を有するコーティング材を創成し、Ti 合金の高速加工・ドライ加工技術の開発を目的として研究を進めた。

ホウ素を過剰に添加することにより TiB₂系薄膜の耐摩耗性は向上し、TiB_{3.3}膜においてはほとんど摩耗は観察されなかった。ただし、工具にコーティングした TiB_{3.3}膜は Ti 合金のドライ切削により B が脱離消失した状態になり、すくい面の一部では剥離が生じた。

研究成果の概要(英文)：The Ti alloys are difficult-to-machine materials because the temperatures rise easily at the tool edge due to their small thermal conductivity. In this work, we attempt to improve the cutting efficiency of the Ti alloys by coating on the tool edge surface with hard and lubricious thin film.

We focused on TiB₂+a thin film as the coating material in which boron was contained excessively compared to TiB₂ thin film. We succeed to obtain the TiB_{3.3} thin film with the hardness of 35GPa. Then, these films showed the high critical loads in the scratch tests.

Then, we created the TiB_{3.3} coated tools, and evaluate the cutting efficiency of the Ti alloys by using the high speed precision lathe. The Ti-B-C coated tool showed better efficiency of cutting than non coated tool. However, the TiB_{3.3} thin film was peeled off at the tool edge surface at the cutting length of 1000 μm.

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：切削加工 コーテッド工具 Ti合金

1. 研究開始当初の背景

(1) 次世代航空機では機体重量の軽量化による燃料消費量抑制の観点から、高強度炭素繊維強化プラスチック (CFRP) の使用量が増加している。それに伴い CFRP との適合性に優れ、かつ高強度で耐熱性に優れた Ti 合金の需要も拡大すると見込まれている (Al 合金は CFRP との接触による電蝕等の問題があり、使用量が減少している)。実際に、ボーイング社の航空機 (B787) では機体重量の 15%にまで Ti 合金の使用量が増加し、エンジンにおいては重量の 20~30%が Ti 合金製部品となっている (森口, 工業会活動, Vol.641, pp.21-33, 2007)。

(2) Ti 合金は熱伝導率が小さく、切れ刃温度が上昇しやすいとともに溶着性が高く、高効率加工が難しい材料である。本研究における協力企業 (航空機用 Ti 合金の加工実績有り) においても、切削油を使用し切削速度を低く抑えて加工しているが、このことが Ti 合金製部品の生産性低下と加工の高コスト化に繋がっている。特に、切削油を用いた加工では、加工時に消費されるエネルギーの 50%程度が切削油供給に費やされているだけでなく、後工程として加工物の洗浄脱脂が必要となり、生産性向上の妨げとなっている。したがって、航空機用 Ti 合金の加工においては、高速化が望まれるとともに、生産性向上および環境対応化の観点から MQL (Minimum Quantity Lubrication) 加工やドライ加工に対するニーズは極めて高い。

2. 研究の目的

航空機用 Ti 合金の高速加工・ドライ加工を実現する上では、工作機械、工具、加工条件のすべてを適切に開発・選定・設定し、新規加工技術として確立する必要がある。本研究においては、Ti 合金の高速加工・ドライ加工における熱的負荷増大が課題であることに着目し、高温潤滑性付与による工具表面の高性能化を通して新規加工技術の開発を目指すこととした。具体的には、ホウ素含有薄膜 (TiB₂, B₄C を出発原料とする TiB₂系薄膜, B₄C 系薄膜) 中のホウ素および酸素含有量を制御することにより、高温潤滑性能を有するコーティング材を創成し、Ti 合金の高速加工・ドライ加工を実現する工具および加工技術の開発を目的として研究を進めていく。

3. 研究の方法

(1) 先述のように、TiB₂系薄膜の方が B₄C

系薄膜より高硬度で密着性に優れるが、Ti 合金との非親和性の観点から、Ti を含まない B₄C 系薄膜の研究も引き続き行い、Ti 合金切削用コーティング材としての高性能化を進めていく (現時点では TiB₂ 系薄膜コーテッド工具での切削に問題はない)。

現時点では、ホウ素および酸素含有量を系統的に変化させたホウ素含有薄膜 (TiB₂系薄膜, B₄C 系薄膜) の機械的特性・高温潤滑性能を評価するには至っていない。また、過剰なホウ素の存在状態も明確になっていない。したがって、ホウ素含有薄膜の機械的特性・高温潤滑性能に及ぼすホウ素および酸素含有量の影響に関する基礎的知見の集積から着手する。成膜は DC スパッタリング装置を用いて行うが、ホウ素および酸素含有量の影響を把握するための下記の実験に注力するため、ターゲットへの印加電力・成膜温度等の成膜条件はこれまでの実験で適切と判断される値 (印加電力: 250W, 成膜温度: 350°C) に固定する。

① TiB₂+Xwt%B ターゲットを用いた成膜において、X=0, 5, 10, 30 としてホウ素含有量の異なる TiB₂ 系薄膜を形成する。得られた薄膜のホウ素含有量、ホウ素の結合状態および結晶性と微小硬度、密着力の関係を XPS, 薄膜 XRD およびナノインデント等により評価する。

② 上記①で行った TiB₂ 系薄膜の創成条件において、O₂ ガスを導入し薄膜中の酸素含有量を変化させる。本実験においてはベースプレッシャーを 4×10⁻⁴Pa に固定し、一定のホウ素含有量の TiB₂ 系薄膜において、酸素含有量を変化させることとする。

③ 上記①および②で得られた TiB₂ 系薄膜を高温大気中で一定時間保持し、熱処理の前後あるいは熱処理条件の違いによる結合状態、結晶構造、表面形状の変化を評価する。これらの結果から静的加熱によるガラス質固体の効率的生成に有効な要因を洗い出す。

④ ガラス質固体の生成温度・生成量が異なる TiB₂ 系薄膜に対して、200°C (現有装置の最高試験温度) において荷重 (P) および速度 (V) を変化させながら摩擦係数を測定し、摩擦温度が上昇する高 PV 領域での摩擦特性とガラス質固体の生成および熔融との関係を明確にする。

(2) ホウ素含有薄膜の高温潤滑性能および密着性が改善された段階で、実際の超硬合金製あるいはサーメット製スローアウェイチップにコーティングし、航空機用 Ti 合金の

旋削加工 (MQL 切削, ドライ切削) を行い, 各種加工条件において, ホウ素含有薄膜がどのような加工性能を示すのかを上記の加工性能評価システムを用いて明確にしていく. あわせて, 一部応用が進められている耐熱性薄膜 (AlCrN 膜, TiSiN 膜等) をコーティングした工具との加工性能の比較を行い, 高温潤滑性能を有するホウ素含有薄膜の特徴を顕在化させる. さらに, 一連の旋削加工実験において, 加工現象の解析 (ホウ素含有薄膜表面でのガラス質固体の生成・熔融の有無の分析・観察, 切削温度・切削抵抗測定, 被削表面形状測定: 申請設備を使用, 切り屑排出状況・切り屑形状観察等) を進め, Ti 合金の高効率加工 (高速加工・ドライ加工) を実現するための最適薄膜組成 (室温での低摩擦化を目指した炭素添加や TiB_2+B_4C ターゲットの使用等を検討予定)・最適薄膜構造を目指してスパッタリングプロセスにフィードバックさせていく.

4. 研究成果

- (1) TiB_2 系薄膜に対しホウ素を過剰に添加することにより 35GPa 以上の高硬度が得られるとともに密着力が向上した. これはホウ素を過剰に添加することにより TiO_2 の生成が抑制されたためと考えられる.
- (2) ホウ素を過剰に添加することにより TiB_2 系薄膜の耐摩耗性は向上し, 図 1 に示すように $TiB_{3.3}$ 膜においてはほとんど摩耗は観察されなかった.
- (3) 超硬合金製スローアウェイチップに, 硬度および密着力が高く, 耐摩耗性に優れていた $TiB_{3.3}$ 膜をコーティングし, Ti 合金のドライ切削を行った. その結果, 切り屑排出性は向上したが, 工具刃先近傍の温度は $600^{\circ}C$ 以上になった (図 2 参照).
- (4) $TiB_{3.3}$ コーテッド工具を用いて Ti 合金を 1000m ドライ切削したところ, すくい面

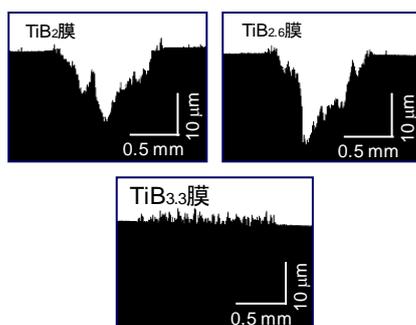


図1. TiB_2 系膜の摩耗痕断面像
(相手材:SUS304,
試験温度: $200^{\circ}C$, 摩擦速度: $0.2m/s$)

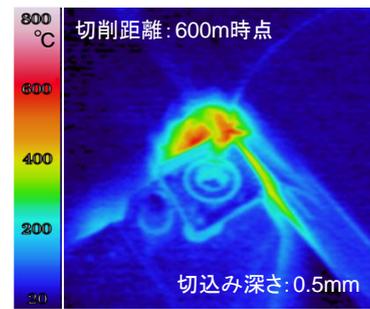


図2. $TiB_{3.3}$ 膜コーテッド工具によるTi合金ドライ切削時の熱画像
(切削速度: $100m/min$)

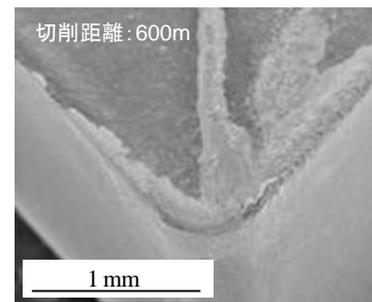


図3. Ti合金ドライ切削後の $TiB_{3.3}$ 膜コーテッド工具刃先のSEM像
(切削速度: $100m/min$)

- の $TiB_{3.3}$ 膜が一部剥離した (図 3 参照).
- (5) $TiB_{3.3}$ 膜の加熱試験を行った結果, $600^{\circ}C$ 以上では表面から B が脱離消失する (TiO_2 生成が支配的になる) ことが明らかとなった (図 4 参照).
- 上述のように, Ti 合金のドライ切削時には工具刃先近傍の温度は B が脱離消失する $600^{\circ}C$ 以上になっていることから, TiB_2 系膜の硬度・密着性・高温潤滑性を維持向上させた上で, 刃先温度上昇の抑制に寄与する $500^{\circ}C$ 以下での潤滑性および冷却性の付与が必要である.

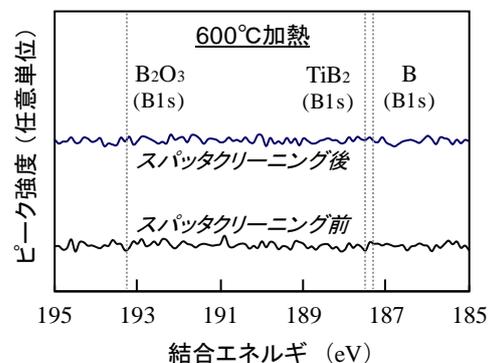


図4. 加熱後の $TiB_{3.3}$ 膜のXPS B1sスペクトル

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 3 件)

① Production of Highly Lubricious Ti-based Ceramic Films for Reducing Friction between Web and Transiting Roller, M. Kohzaki and R. Makita, Jpn. J. Appl. Phys., 査読有, Vol.52, No.5, (2013) 05DA03.

② Improvement Cutting Efficiency of Titanium Alloys by Ti-B-C Coated Tool, R. Makita and M. Kohzaki, Proceedings of The International Conference on Materials Processing and Technology 2012, 査読有, pp.129-132, (2012).

③ 難削材加工用 B-C 系コーティング材の開発, 神崎昌郎, 森田次郎, 砥粒加工学会誌, 査読有, Vol.56, No.1, pp.34-39, (2012).

[学会発表] (計 6 件)

① Preparation of Hard and Lubricious Films by Magnetron Sputtering (invited), M. Kohzaki, The International Conference on Materials Processing and Technology 2013 年 6 月, タイ・バンコク.

② Low Frictional Properties of Ti-based Ceramic Film Prepared by DC Magnetron Sputtering, M. Kohzaki, The 2012 International Conference on Flexible and Printed Electronics, 2012 年 9 月, 東京.

③ ホウ素過剰添加による Ti 合金切削用 TiB₂ 系コーティング材の高性能化, 牧田亮平, 神崎昌郎, 第 20 回機械材料・材料加工技術講演会, 2012 年 11 月, 大阪.

④ 高機能を発揮する最先端コーティング技術, 神崎昌郎, 精密工学会中国四国支部講習会「これから広がる先進材料の加工技術」, 2012 年 9 月, 岡山.

⑤ 難削材加工用 B-C 系コーティング材の開発, 神崎昌郎, 森田次郎, 2011 年度砥粒加工学会学術講演会, 2011 年 9 月, 岡山.

⑥ スパッタ法による機械システム用潤滑性硬質膜の創成, 神崎昌郎, 日本塑性加工学会接合・複合分科会 第 79 回研究会, 2011 年 6 月, 神奈川.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

○取得状況 (計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

[その他]
ホームページ等
http://www.mech.u-tokai.ac.jp/~kohzaki_lab/

6. 研究組織

(1) 研究代表者
神崎 昌郎 (KOHZAKI MASAO)
東海大学・工学部・教授
研究者番号: 20366024

(2) 研究分担者 ()

研究者番号:

(3) 連携研究者 ()

研究者番号: