研 究

傾斜構造を有する炭化ケイ素シャンクのダイヤモンド精密切削工具の開発

李 敬鋒^{☆1}, 西尾 典幸^{☆2}川崎 亮^{☆1}, 渡辺 龍三^{☆1}^{☆1} 東北大学工学部, 〒980 仙台市青葉区荒巻字青葉.^{☆2} (株)日本セラテック, 〒981-31 仙台市泉区明通3-5.

Development of Diamond Tools for Superprecision Machining with Compositionally Graded Layers from Silicon Carbide Shank to Diamond Chip

Jing-Feng Li^{☆1}, Noriyuki Nishio^{☆2}Akira Kawasaki^{☆1} and Ryuzo Watanabe^{☆1}^{☆1} Faculty of Engineering, Tohoku University, Aramaki-aza-aoba, Sendai 980.^{☆2} Nihon Ceratec Company Ltd., 3-5 Akebori Izumi-ku, Sendai 981-31.

Received February 10, 1994

Diamond cutting tools are getting increasing uses for superprecision machining. For conventional diamond tools, a vibration known as slight waviness is generated to deteriorate the machining accuracy because of the low stiffness of silver solder containing active metals used to join a diamond chip onto a metallic alloy shank. In order to overcome this problem, a diamond tool with silicon carbide shank by reaction sintering was developed. Numerical calculation by the finite element method (FEM) was carried out to clarify the thermal residual stresses between the diamond chip and silicon carbide shank with and without compositionally graded joining layers. The FEM calculation clearly showed that thermal stress between the diamond chip and silicon carbide shank was greatly reduced by inserting the compositionally graded layers. The fabrication process and performance of the developed diamond tool were also described.

1 緒 言

光学機器やコンピュータ機器においては、コンタクトレンズやコンピュータのハードディスク基板、レーザプリンタのポリゴンミラーなど超精密な加工精度が要求される部品が多い。それらのハイテク部品はアルミニウム合金やプラスチックなどの軟質素材から作られており、その切削加工にダイヤモンド工具、特に単結晶ダイヤモンド（いわゆる Single Point Diamond）工具がよく使用されている¹⁾。従来の工具では、超硬合金のシャンク（柄の部分）にダイヤモンド単結晶がろう付け加工されている。しかし、ろう付け部分の剛性が

不十分なため、加工時に“びびり”といわれる振動が発生し、加工精度が低下するという問題がよく起きる。したがって、ろう付け層を介しない、シャンクとダイヤモンドチップとの一体化接合が望まれている。

そこで、シャンク材質を炭化ケイ素に変えることにより、反応焼結により炭化ケイ素シャンクを形成すると同時にシャンクとダイヤモンドチップとを一体成形する方法が考案された^{2),3)}。しかし、Fig.1 に示すように、炭化ケイ素シャンクの先端にダイヤモンドチップを直接接合した場合、ダイヤモンドと炭化ケイ素の間には良い接合界面が形成されたものの、ダイアモン

Fig. 1 Typical crack observed in the diamond chip directly bonded onto silicon carbide shank.

ドチップ側にクラックが生じた。後述のように、このクラックの発生は炭化ケイ素とダイヤモンドとの熱物性のミスマッチに起因する熱応力によるものと推測される。この熱応力を緩和するためには、炭化ケイ素シャンク側のダイヤモンドチップへの接合部分において、ダイヤモンドと炭化ケイ素の組成比を変化させる傾斜組成層を導入するのが有効であると考えられる。

本報告では、有限要素法によるダイヤモンドと炭化ケイ素との間に生じる熱応力の解析と、それに基づく傾斜構造を有するダイヤモンド/炭化ケイ素系精密切削工具の作製プロセスについて述べる。

2 試料および実験方法

2-1 炭化ケイ素/ダイヤモンド (SiC/Dia) 複合体 (無傾斜材) の作製と物性値測定

炭化ケイ素粉末にダイヤモンド粉末を0~80vol%の割合で混合し、さらに炭素系成形剤を添加した混合粉を金型ダイスにより弾性率測定用の角棒状試料 (長さ35mm×幅4mm×高さ3mm) と熱膨張係数測定用の円柱状試料 (直径10mm×高さ10mm) に仮成形した。次に、炭素系成形剤の炭化処理を行いカーボンと炭化ケイ素粒子 (1次粒子) からなる多孔質のプリフォームを得た。プリフォームに溶融シリコンを溶浸すると、カーボンとシリコンが反応して2次炭化ケイ素結晶が

生成される⁹⁾ ことにより緻密な炭化ケイ素/ダイヤモンド複合体が得られる。

得られた試料についてヤング率、ポアソン比および熱膨張係数を測定した。ヤング率とポアソン比はひずみゲージを併用した4点曲げ試験法により、熱膨張係数はディラトメータによる室温から900℃までの平均値として求めた。

Fig. 2 3-D models for FEM calculation of thermal residual stress in the diamond tools. Model (A) for machining contact-lenses, model (B) for machining polygon mirrors.

2-2 有限要素法による熱応力計算

製造温度 (1400℃) から室温まで冷却する過程において生じる熱応力を計算する。計算は汎用有限要素解析法であるMARC-SYSTEMにより、またFig.2に示すように工具の先端接合部分と同じ形状を有する3次元モデルを用いた。計算温度範囲では、本系材料の塑性変形は考えられないので、計算には弾性変形のみ考慮した。また、傾斜化接合の場合は、図中に示したような組成分布を付与した。

3 実験結果および考察

Fig.3に炭化ケイ素単体および炭化ケイ素/ダイヤモンド複合体の破面のSEM写真を示す。いずれも相対密度が95%以上の緻密な焼結体である。写真の中に

Fig. 3 SEM micrographs of the fractured surfaces of reaction sintered SiC and SiC/Diamond composites.

Table 1 Properties of reaction sintered SiC and SiC/Diamond composites

Materials	Properties		
	E (GPa)	ν	α (K^{-1})
SiC	361	0.171	5.42×10^{-6}
SiC-20%Dia	411	0.158	4.87×10^{-6}
SiC-40%Dia	426	0.155	4.17×10^{-6}
SiC-60%Dia	484	0.155	3.85×10^{-6}
SiC-80%Dia	560	0.129	3.75×10^{-6}
Diamond	1054	0.1	3.70×10^{-6}

(E: Young's modulus, ν : poisson's ratio, α : coefficient of thermal expansion)

黒く見える粒子は平均粒径が約 $100 \mu m$ のダイヤモンド結晶粒であるが、その他にFig. 3の写真では判別できない平均粒径約 $2 \mu m$ のダイヤモンド粒子も含まれている。

Table 1 に実測した炭化ケイ素単体および炭化ケイ素／ダイヤモンド複合体のヤング率，ポアソン比および熱膨張係数を示す。ダイヤモンドについての値は参考文献⁹⁾から引用したものである。ヤング率はダイヤモンドに比べて炭化ケイ素の方が小さいが，熱膨張係数は炭化ケイ素の方が大きい。複合体は組成に応じた値を示す。以下の熱応力計算にはTable 1 に示した物性値を用いた。

Fig. 4 にFig. 2 に示した2種の計算モデルについて得られた各主応力の最大応力値を示す。いずれのモデルにおいても，直接接合の場合は最大の引張り垂直応力と最大のせん断応力が約 $400 MPa$ に達する。傾斜化接合を行うことにより，各成分応力はそれぞれ約10～80%に低減することがわかる。

Fig.4 Comparison of thermal residual stress in the diamond tools with and without FGM joining layers. Model (A) for contact lens, model (B) for polygon mirror.

Fig.5 にダイヤモンドチップと炭化ケイ素ジャンクとの無傾斜接合について得られたフォン・ミッセスの相当応力分布を示す。2種のモデルにおいてほぼ同様な熱応力分布が得られた。応力は接合界面に集中しており，その最大値は約 $1000 MPa$ に達することが示されている。また応力成分を解析した結果，垂直応力はダイヤモンドチップ側で，せん断応力は接合界面近傍で最大値を示すことが分かっており，このことによりFig.1 に示したようなクラックが生じたと考えられる。

Fig.5 Distribution of equivalent Von Mises stress in the tools with the diamond chip directly bonded onto the SiC shank.

Fig.6 Distribution of equivalent Von Mises stress in the tools with FGM joining layers from the SiC shank to the diamond chip.

ダイヤモンドチップとシャンクの接合近傍に傾斜層を導入すると、Fig.6に示すように熱応力が大幅に緩和されたことが明らかになった。接合界面における応力集中がなくなったばかりではなく、最大応力値も無傾斜接合の約1/3になった。この時点での応力集中はSiC-20% DiaとSiC単体の間に見られるが、さらに必要に応じてその間により細かい傾斜組成層を入れると、熱応力をより低減できると考えられる。

4 傾斜構造を有する工具の作製

Fig.7に傾斜構造を有するダイヤモンド工具の作製プロセスの模式図を示す。まず、2-1に述べた無傾斜材の作製プロセスと同様に、配合比の異なる炭化ケイ素粉末とダイヤモンド粉末、および炭素系成形剤の混合体から板状の仮成形体を作製する。次に、工具の形状を有する金型ダイスの先端部分にその仮成形体を積層配置した状態で加圧成形してシャンクの仮成形体を作る。その仮成形体について炭化処理を行い、先端部分でダイヤモンド含有量を変化させたシャンクのプリフォームを作製す

Fig.7 Schematic drawing of fabrication process of diamond tools with FGM joining layers from the SiC shank to the diamond chip.

Fig.8 Macro views of the developed diamond tools with FGM joining layers from the SiC shank to the diamond chip.

る。最後にシャンクの先端にダイヤモンドチップを配置しておいて、シリコンを溶浸することによりダイヤモンドチップがシャンクに強固に付いた工具が得られる。Fig.8に作製したダイヤモンド工具の全体写真を示す。従来のろう付けタイプのダイヤモンド工具に比べて、開発したダイヤモンド工具は加工精度と寿命はそれぞれ5～6倍および1.3倍向上したことが明らかになった。

傾斜化を施した工具におけるダイヤモンドチップと炭化ケイ素シャンクの接合はダイヤモンドとSiC-80vol%Dia複合体との結合によるものである。Fig.9に組織観察の結果を基にした結合の模式図を示す。シャンクの溶浸過程では局部的にダイヤモンドチップ表面とシリコンが反応して厚さ約1～10 μ mの反応層を形成する。その反応層は結晶構造が炭化ケイ素に近く、結合層の役割を果たしていると推測される。

5 まとめ

炭化ケイ素セラミックスをダイヤモンド切削工具のシャンク材として用いると、反応焼結法によりシャンク形成と同時に、シャンクとダイヤモンドチップ間にろう

Fig.9 Schematic drawing of bonding structure in the diamond tool with FGM joining layers.

① diamond chip, ② bonding phase,
③ diamond particle, ④ reaction sintered SiC.

材を介さない一体化接合の可能となる利点がある。しかし、炭化ケイ素とダイヤモンドは熱膨張係数とヤング率が大きく異なるため、直接接合では熱応力によるクラックが生じ無欠陥の工具は得られていない。そこで、ダイヤモンドチップと炭化ケイ素シャンクとの接合近傍にダイヤモンド粒子の含有量を段階状に変化させた傾斜組成層を導入することにより熱応力を大幅に低減することができ、高性能のダイヤモンド工具が得られる。

以上の結果について、傾斜層導入の有無に分けて有限要素法により熱応力の数値計算を行い、傾斜化による熱応力の緩和効果を明らかにした。

謝 辞

本開発工具の性能評価試験は株式会社東京ダイヤモンド工具製作所 高橋洋一、小坂橋 康浩両氏によりなされたものである。記して感謝申し上げる。

文 献

- 1) 田中克敏：“ダイヤモンドツール”，日経技術図書，(1987)，764.
- 2) 西尾典幸，鈴木 隆，林 睦夫：特開平3-149107.
- 3) 西尾典幸：特願平3-141478.
- 4) 阿部 弘，川合 実，菅野隆志，鈴木恵一朗：“エンジニアリングセラミックス”，技報堂，(1985)，102.
- 5) 小泉 聡，犬塚直夫：エレクトロニク・セラミックス，23(117)，(1992)，11.