

氏 名	小関 秀峰
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	総博甲第 1 1 2 号
学位授与年月日	平成 2 8 年 9 月 2 6 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項
文部科学省報告番号	甲第 5 8 0 号
専 攻 名	マテリアル創成工学専攻
学位論文題目	Ni 基超耐熱合金および Ti 合金切削加工時の工具損傷機構に関する研究 (Study on Damage Mechanisms of Cutting Tools during Machining of Ni-based Superalloy and Titanium Alloy)
論文審査委員	主査 島根大学教授 臼杵 年 島根大学教授 大庭 卓也 島根大学教授 山田 容士 島根大学准教授 森戸 茂一

論文内容の要旨

Ni 基超耐熱合金および Ti 合金は、航空機産業やエネルギー、発電産業において重要な部材として用いられており、高精度・高能率に加工することが要求されている。一方で、これらは典型的な難削材として知られており、切削加工時の工具摩耗の進行速度が高いため、耐摩耗性に優れた工具材料が求められる。本研究では、これらの被削材について、切削加工時の工具損傷状態を微視的に観察することで、損傷機構を明らかにし、工具開発指針を得ることを目的とした。

第 1 章では、研究背景として、切削加工における工具損傷と、これまでの工具材料の進歩について概説した。また、Ni 基超耐熱合金と Ti 合金の用途と被削性について論じた。次いで、本研究の意義と目的を述べた後、本論文の構成について示した。

第 2 章では、Ni 基超耐熱合金 Alloy 718 を PVD コーテッド工具で連続切削したときの工具損傷状態を観察し、摩耗過程を調査した。切削初期から工具表面に凝着物が付着し、その直下においてコーティングの塑性変形と微細破壊が観察された。凝着物は被削材組成のまま付着しており、凝着物／コーティング界面に拡散を伴う物理化学的反応や結晶の整合性は確認できないことから、凝着物は物理的もしくは力学的に付着したものと考えられた。また、切削初期において、コーティングに含まれる欠陥（ドロップレット）を起点とした破壊形態を伴う摩耗の痕跡が確認された。逃げ面においては、被削材に含まれる(Nb,Ti)C 粒子によるアブレシブ摩耗が生じることを明らかにした。これらの観察結果に基づき、工具の各部位における摩耗形態を分類するとともに、工具損傷モデルを提案した。

第 3 章では、第 2 章で提案した工具損傷モデルの妥当性について検討した。まず、組成や成膜方法の異なる PVD コーテッド工具を準備し、硬さ増大（耐塑性変形性向上）とドロップレット量の低減が摩耗抑制に及ぼす影響を調べた。ドロップレット量の低減は初期摩耗を軽減し、耐塑性変形性向上は定常摩耗速度を低下させることが示唆された。次いで、各種 PVD

法と CVD 法による TiN コーテッド工具を用意し、切削性能とコーティング特性との相関を調査した。切削性能は CVD コーティングが最も優れ、ドロップレットを含まないために切削初期の摩耗は破壊形態を示さず、耐塑性変形性が高いために PVD コーティングに比べて定常摩耗速度が低いことが確認された。これらの結果は、第 2 章で提案した工具損傷モデルの妥当性を示した。さらに、それぞれの TiN コーティングについて、熱負荷をかけた後の結晶構造や組織、硬さを評価した。その結果、PVD コーティングは切削温度（800℃）付近でひずみが解放されることで、これを駆動力とした粒成長や硬さの低下が生じたと考えられた。一方で、CVD コーティングは高温での組織安定性が高く、軟化抵抗、高温硬さが高いことがわかった。これらの特性がコーティングの耐塑性変形性の向上に寄与し、定常摩耗速度を低下させた要因と考えられた。以上から、Ni 基超耐熱合金の連続切削用工具のコーティングには軟化抵抗に優れ、微細組織により硬さを高めた CVD コーティングが適することを見出した。

第 4 章では、第 2 章と同様の手法により、Ti-6Al-4V 合金を PVD コーテッド工具で連続切削したときの工具損傷状態を調査した。Alloy 718 切削時の損傷状態と比較することで、それぞれの難削性の違いについても考察した。Ti-6Al-4V 合金切削時のコーティング損傷は平滑な摩耗形態ではなく破壊形態を示したことから、工具材料には比較的靱性の高い超硬合金の方が適すると考えられた。凝着物／コーティング界面には特定の結晶方位関係が確認され、これによって凝着界面の付着強度が高められた可能性があると考えた。凝着物は 100 nm 以下の微細化した組織で構成され、降伏応力は高いが、延性は低いと見積もられた。従って、切削中のせん断力によって、まず凝着物が破断し、そのときに生じたクラックがコーティングへ伝播することでコーティングが破壊したと推察した。一方で、Alloy 718 切削加工時も凝着物は 100 nm 以下に微結晶化した。この凝着物は降伏応力が高く延性もあるため、破断することなくコーティング上をしゅう動したと考えられた。その際に、凝着物とコーティング界面に十分な切削熱とせん断力が負荷されたことで、コーティングの軟化と塑性変形が生じたと考えられた。以上のことから、Ti-6Al-4V 合金と Alloy 718 切削時のコーティング損傷について、凝着物の材料特性と凝着界面における結晶方位関係の有無を考慮することで、損傷形態を説明できるモデルを提案した。

第 5 章では、Alloy 718 を断続切削したときの PVD コーティングの損傷状態を調査した。コーティングの損傷形態は、連続切削時と同様に塑性変形を伴う凝着摩耗および疲労摩耗を示した。また、コーティング内に基材に対して平行方向に生じたクラックが観察されており、これは切削中の摩擦力が原因と推定された。PVD コーティングの組成を見直し、切削中の摩擦力を低減することで、工具摩耗が抑制されることを実験的に検証した。断続切削は連続切削に比べ、切削中の熱影響は小さいので、PVD 法の選択が可能であり、軟化抵抗が高く、低摩擦力を示す高 Al 含有の (Al,Ti)N 組成の適用が工具摩耗抑制に有効であることを確認した。

第 6 章では、Ti-6Al-4V 合金を断続切削したときの PVD コーティングの損傷状態を調査した。コーティングの損傷形態は連続切削時と同じく破壊形態を示し、凝着物／コーティング界面に結晶方位関係が確認された。また、Alloy 718 を断続切削したときと同様にコーティング内に基材に対して平行方向にクラックが生じた。クラックの発生は、摩擦力に起因するせん断応力が、コーティングの内部欠陥に集中したことが原因と考えられた。熱衝撃試験によってコーティングに含有されるドロップレット量を評価し、欠陥量が少ないほど切削時のコーテ

ィングの破壊が軽減する傾向を確認した。第4章と第6章の結果を含め、Ti-6Al-4V 合金切削加工用工具の開発指針として、欠陥（ドロップレット）量が少なく、高靱性を有することが必要であることを論じた。

第7章では、本研究を総括した。工具損傷状態の微視的観察結果に基づき、Ni 基超耐熱合金と Ti 合金切削時の工具損傷機構を明らかにした。また、それぞれの被削材についての工具開発指針をまとめた。今後、被削材の特性向上により、ますます難削性が高まることが予想されるが、Ni 基超耐熱合金と Ti 合金それぞれの類似特性を有する被削材については、本知見を活かした工具開発が可能であると考ええる。

論文審査結果の要旨

Ni 基超耐熱合金および Ti 合金は、航空機産業やエネルギー、発電産業において重要な部材として今後さらに需要増大が見込まれ、高精度・高能率加工が要求されていると同時に、耐摩耗性に優れた工具材料が求められる。

本研究においては、これらの被削材について、切削加工時の工具損傷状態を微視的に観察することで、損傷機構を明らかにし、工具開発指針を得ることを目的とした。

第1章では、「本研究の研究背景」、「切削加工時の工具損傷と工具材料の進歩」、「Ni 基超耐熱合金と Ti 合金の用途と被削性」、「本研究の意義と目的」、「本論文の構成」について述べた。

第2章では、Ni 基超耐熱合金 Alloy 718 を PVD コーテッド工具で連続切削したときの工具損傷状態を観察し、摩耗過程を調査した。切削初期から工具に付着した凝着物直下において、コーティングの塑性変形と微細破壊が観察された。凝着物は凝着物／コーティング界面に拡散を伴わず、結晶の整合性も確認できなかった。また、切削初期にコーティングに含まれる欠陥（ドロップレット）を起点とした破壊摩耗の痕跡が観察された。逃げ面については被削材に含まれる(Nb,Ti)C 粒子によるアブレシブ摩耗が生じることを示した。これらの観察結果を基に、工具損傷モデルを提案した。

第3章では、第2章で提案した工具損傷モデルの妥当性について検討した。まず、組成や成膜方法の違いによる、硬さ増大（耐塑性変形性向上）とドロップレット低減（破壊摩耗の軽減）が摩耗抑制に及ぼす影響を調べた。切削性能はドロップレットを含まず耐塑性変形性も高い CVD コーティングが最も優れていることを確認し、前章の工具損傷モデルの妥当性を示した。

第4章では第2章と同様の手法により、Ti-6Al-4V 合金を PVD コーテッド工具で連続切削したときの工具損傷状態を調査した。Alloy 718 切削時の損傷状態と比較することで、それぞれの難削性の違いについても考察した。凝着物は 100 nm 以下の微細化組織で構成され、コーティング／凝着物界面には特定の結晶方位関係が確認され、これによって凝着界面の付着強度が高められた可能性があることを示した。そして Alloy 718 切削加工時の状況と比較して、Ti-6Al-4V 合金と Alloy 718 切削時のコーティング損傷について、凝着物の材料特性と凝着界面における結晶方位関係の有無を考慮することで、損傷形態を説明できるモデルを提案

した。

第5章では、Alloy 718 を断続切削した時の PVD コーティングの損傷状態を調査した。コーティングの損傷形態は、連続切削時と同様に塑性変形を伴う凝着摩耗および疲労摩耗を示した。また、基材に対して平行方向にクラックが生じたことが観察されており、切削中の摩擦力が原因と推定された。そこで PVD コーティングの組成を見直し、軟化抵抗が高く、低摩擦力を示す高 Al 含有の (Al,Ti)N 組成の適用が工具摩耗抑制に有効であることを確認した。

第6章では、Ti-6Al-4V 合金を断続切削したときの PVD コーティングの損傷状態を調査した。コーティングの損傷形態は連続切削時と同じく破壊形態を示し、凝着物／コーティング界面に結晶方位関係が確認されると同時にコーティング内に基材に対して平行方向にクラックが生じた。第4章と第6章の結果を含め、Ti-6Al-4V 合金切削加工用工具の開発指針として、欠陥（ドロップレット）量が少なく、高靱性を有することが必要であることを論じた。

第7章では、本研究を総括した。工具損傷状態の微視的観察結果に基づき、Ni 基超耐熱合金と Ti 合金切削時の工具損傷機構を明らかにし、損傷機構に基づき、それぞれの被削材についての工具開発指針をまとめた。今後、被削材の特性の向上により、ますます難削性が高まることが予想されるが、Ni 基超耐熱合金と Ti 合金それぞれの類似特性を有する被削材についても、本知見を活かした工具開発の可能性と各種工具開発への拡がり期待される。