

フジセ カズノリ

氏 名 藤瀬 憲則

学位の種類 博士 (工学)

学位記番号 博第1175号

学位授与の日付 2020年3月31日

学位授与の条件 学位規則第4条第1項該当 課程博士

学位論文題目 チタン合金の切削加工における工作機械因子が工具寿命に与える影響に関する研究
(Study on the effect of machine tool factors on tool life in cutting titanium alloy)

論文審査委員 主査 教授 糸魚川 文広
教授 北村 憲彦
教授 西田 政弘

論文内容の要旨

本研究は工具寿命に影響を及ぼす4つの因子のうち工作機械因子について検証し、工作機械または工具などの設計へフィードバックし工具費削減や生産性向上を目指すものである。切削加工において、工具寿命に影響を及ぼす因子として工具因子、被削材因子、切削条件因子があることは一般的に知られており、長年数多くの研究がなされている。しかし、工作機械因子についてはいくつかの研究があるに過ぎず、その要因は工作機械および工具の剛性であるとされているが、工具寿命との因果関係は不明のままである。一方で、工作機械や工具などの剛性不足などで引き起こされるびびり振動によって工具寿命が低下することが知られており、びびり振動の振動数および振幅により工具摩耗や損傷の形態が異なること、びびり振動による相対切削速度の変動および逃げ面の垂直応力の増大が要因であることが示されている。また近年、成長が著しい航空機産業に用いられるチタン合金の切削加工においては、切削温度または振動などの問題により工具寿命が低下し高能率な切削加工が妨げられている。前者の切削温度に関しては高圧クーラントや極低温切削による工具冷却が効果を示している。一方で、後者の振動に関しては安定限界線図によるびびり振動抑制技術があるが、チタン合金は40-60 m/minの低速で切削加工が行われるため安定領域の利用が困難である。そのため、工作機械や工具などの動剛性

を高める必要があるが、その具体的な対策が十分に検討されていない。そこで、本研究では切削点に近い主軸系および工具系の動的特性に着目し、びびり振動が発生しない場合の工具損傷形態や工具寿命に与える影響を解明し、工作機械または工具などの設計へフィードバックすることを目的とした。まず、第 2 章では切削点に近い主軸系および工具系の動的特性に着目し、工作物の把持力および工具突出し長さにより動的特性を変更してびびり振動が発生しない場合の工具損傷形態や工具寿命への影響を検証した。どちらの動的特性も工具摩耗形態へは影響を与えないが、工具突出し長さによる動剛性の低下は逃げ面摩耗の進行速度を著しく速くした。これは工具の曲げ振動により工作物と工具逃げ面の相対切削速度が僅かに速くなったためである。次に、第 3 章では工具寿命に及ぼす影響の大きかった工具系の動的特性に対し、どの方向の剛性および振動が工具損傷形態や工具寿命にどのような影響を与えるか詳細に検証した。そこで、切削加工における 3 分力のうち主分力方向または背分力方向の 1 方向のみに剛性が低く振動しやすい平行板ばね構造治具を製作し、連続切削および断続切削での工具寿命試験を実施した。背分力方向に剛性が低い場合は、連続切削および断続切削ともにびびり振動の発生により、主分力方向に剛性が低い場合または板ばね構造治具なしの十分に剛性が高い場合と比較して工具寿命が著しく低下した。一方で、主分力方向に剛性が低い場合は、びびり振動は発生せず連続切削では十分に剛性が高い場合と同等の工具寿命となった。そして、断続切削では十分に剛性が高い場合よりチップングの発生が遅くなり工具寿命が延びた。これは、主分力方向に剛性が低い場合は、板ばね構造がクッションとなり断続切削時の衝撃力を緩和したためである。最後に、第 4 章では第 2 章、第 3 章の知見をもとに断続切削時の衝撃力を緩和し耐欠損性を向上させるための板ばね構造ミリング工具を製作し、その有効性とメカニズムについて検証した。工具寿命試験の結果、通常工具と比較して耐欠損性が向上し工具寿命が延びることが示された。それは板ばね構造が切削力により主分力方向に弾性変形することで、工具食いつき時の切削力の立上り時間を遅くし衝撃力を緩和するためである。また、板ばね構造ミリング工具を 1 自由度のばね質量系でモデル化し動荷重係数により衝撃力を推定したところ、工具食いつき時の切削力の測定結果と一致する傾向を示した。さらに、衝撃力は切削力の立上り時間と工具固有周期の比で決まることが示された。本研究での知見は、振動抑制のため従来のダンパや高減衰材料を用いた高価な工具ではなく、板ばね構造ミリング工具のようなシンプルな構造でも工具の動剛性を最適設計することで、断続切削時の衝撃力を緩和し耐欠損性が向上し工具寿命を延ばすことが可能であることが示唆された。ただし、板ばね構造が切削力により弾性変形するため、加工精度および面品位の点において通常工具より性能が少し劣る。よって、板ばね構造ミリング工具は仕上げ加工での使用には向かず、荒加工での使用範囲で有用である。

論文審査結果の要旨

当審査委員会は藤瀬憲則氏の学位授与に関し提出された博士論文、論文目録、論文内容の要旨などの書類について審査するとともに、学力の確認を行い、以下の結論を得た。

藤瀬氏の論文は、切削加工する際の工具寿命を左右する因子として十分に調査が行われていない工作機械因子（動剛性）について、詳細な加工実験によりその工具寿命への影響を明らかにし、さらに工具を長寿命化させる手法を提案するものである。

この論文で被削対象としたのは、近年、航空機を中心に構造材料として利用が増大するチタン合金で、鍛造による複雑部品製造が難しく切削加工による大量の除去加工が必要とされており、切削工具の長寿命化は生産現場における喫緊の課題となっている。この課題に対し工具材料からのアプローチ、加工条件からのアプローチに関しては数多くの研究が報告されているが、工具寿命のバラつきに大きく影響すると考えられる工作機械の動剛性と工具寿命の関係についての研究は、びびり振動の有無との関係で論じられているのがほとんどであり、びびり振動のない場合、すなわち一般的な加工状態における研究はほとんどなされていなかった。

この論文では、まず、切削点における相対工具位置や姿勢に影響が大きい主軸系の剛性と工具系の剛性を変化させて工具摩耗の進展を観察し、工具寿命は主軸系の剛性と強く、工具系の剛性と強い相関があることを見出した。さらに、工具剛性においても工具寿命を悪化させるのは、背分力方向のみに剛性が低い場合であることが分かった。一方、主分力方向のみに剛性を下げた場合は十分剛性の高い場合に遜色ない工具寿命であることも見出した。さらに、断続切削では主分力方向のみに剛性を下げることで、刃先の欠損が抑止され、結果として高剛性な場合に比べ工具寿命が延長できた。この結果をもとにエンドミルなどの回転工具の曲げ剛性に異方性を持たせチタン合金のミリング加工における工具寿命を改善できる手法を提案した。

これまでびびり振動を抑止する観点から、無条件に工作機械各部の剛性は高いほど良いと考えられてきた。しかし、チタン合金切削のように刃先温度が高くなり工具寿命の決定因子が刃先近傍のクレータ摩耗や欠損である場合には、工具支持部の剛性を背分力方向に高く、主分力方向に低い異方性を持たせることで、びびり振動の抑止とともに工具寿命の延長が期待できることを示した。これは、チタン合金をはじめとする難削材部品の生産性、国際競争力を向上に資する技術開発といえる成果であり、その価値は非常に大きい。また、工具摩耗形態の詳細観察から損傷モデルを仮設し課題解決に至る解を導きだす姿勢は研究者としての資質も十分であると認められる。

以上より、当審査委員会は一致して藤瀬氏の論文審査および学力の確認の結果を合とするとともに、同氏への博士(工学)の学位授与を可とすることが適当であるとの結論に至った。