氏　　　　　名	Burdukovskyi Ivan
博士の専攻分野の名称	博士（工学）
学 位 記 番 号	博理工乙第 222 号
学位授与年月日	平成 27 年 3 月 24 日
学位授与の条件	学位規則第 4 条第 2 項該当
学 位 論 文 題 目	DEVELOPMENT OF FIXING SYSTEM WITH 2-AXIS LOW FREQENCY VIBRATION FOR MICRO DEEP DRILLING （微細深穴あけ加工のための２次元低周波振動付与工作物保持システムの開発）
論 文 審 査 委 員	委員長　教　授　堀尾　健一郎
	委　員　教　授　高崎　正也
	委　員　准教授　長嶺　拓夫
	委　員　准教授　金子　順一

論文の内容の要旨

In recent years, the miniaturization of the nozzles in the gas turbines for the thermal power stations or in the marine diesel engines has been required to cope with the technological innovations of the high-pressure fuel injection. Therefore, it is considered that diameter of future holes in the nozzles must be reduced to 0.2 mm or below from the current value of 1.0 mm. The aim of the previous study was improvement of micro deep drilling at hard materials (such as Stellite, Hastelloy or SUS304), which hole diameter is 0.2 mm or below and an aspect ratio (L_h/d_h) of 20 or above. The micro deep drilling of hard materials is required including of step feed in the process that increases machining time. To decrease the machining time by increasing the step feed while maintaining tool life, two methods had been proposed. Increasing of the step feed is providing by reducing of cutting force. The first method reduces the cutting force by applying of the ultrasonic vibration in the micro drilling by oscillation of the tool (frequency ～ 40 kHz, amplitude ～ 1 μm). The second method also reduces the cutting force by applying of low frequency vibration in the micro drilling by oscillation of workpiece (frequency ～ 150..250Hz, amplitude ～ 10μm). Each method can improve the drilling process independently because of different vibration parameters by frequency (～ 40kHz and ～ 200Hz) and amplitude (1μm and 10μm). Presence of two types of vibrations makes requirement of different way including its to the drilling process (oscillating of the tool and the workpiece).

The nozzle has a curved shape in place for the drilling that means processing of the 2-axis drilling. To cope with the drilling process assisted by low-frequency vibration of curved surface, we have developed fixing system for 2-dimensional vibration. The fixing system for 2-dimensional vibration (FS2DV) consists of horizontal and vertical vibration sources with spring systems along directions of the sources. We select voice coil actuator (VCA) for using as the vibration source to supply enough of power for oscillation the workpiece with one spring system and connecting parts. The direction and value of the 2-dimensional vibration is passively controlled by amplitude ratio and values of the vibrations from the vertical and horizontal sources. The spring systems have variable rigidities for using of the FS2DV

with different vibration frequency. The vertical spring system consists of number of plates (made of spring steel), which are fixed between internal and external collars. Rigidity of the vertical spring system is varied by changing number and shape of the spring plates. The horizontal spring system consists of three sets with belleville springs located at 120º relatively to each other, which are fastened on the external collar of the vertical spring system. Rigidity of the horizontal spring system is varied by changing number and assembling combination of the belleville springs.

Thrust force (6…10N) from drilling process induces unintended displacement of the workpiece. Depending on unbalancing between rigidities of the vertical and horizontal systems, unintended displacement may create hole diameter error. Setting of the spring systems with balanced rigidities can minimize influence of the unintended displacement on the hole diameter error. Analysis of the vertical and horizontal spring systems was made for successful using of the FS2DV during 2-axis micro deep drilling process assisted by low frequency vibration. Based on this analysis, the setting requirements of the FS2DV have been proposed for particulars vibration frequencies.

The FS2DV have been verified for controlling vibration under loading force (which imitate the axial force of drilling) with different angles (15°, 45°, 75°) or frequency (149.5Hz, 198.0Hz, 252.3Hz). Rigidities of the spring systems were adjusted with values that they satisfy to mention above requirements for each frequency (800 kN/m, 1050 kN/m, 1600 kN/m). Resultant vibration was measured by laser sensor of displacement in vertical and horizontal directions. The analysis of the experimental results has been made. The total hole diameter error can be 2.1…3.7μm (depending on vibration frequency and direction), but it is not big compering with 6μm, which is a standard hole's tolerance with diameter 0.2 mm.

At the final, we observe the deviation of the thrust force during vibration process, because the thrust force is important parameter of the drilling. The trust force may enlarge the temperature of drill's edge or initiate breakage of the drill. So the thrust force measuring is made during vibration process with frequency 198.0Hz, amplitude 10μm and direction 45º. The thrust force deviation is present during the vibration process. It is up to 1.3 N with the frequency of workpiec's vibration and 0.4 N with frequency about 1200Hz. The thrust force is not big relatively to the value of thrust force of the drilling at the study of Dr. Nanbu (9 N).

From experimental and analytical study, we obtain the following conclusions:

It was proposed concept for passive controlling of the vibration. It consists in passive controlling of two the independent vibrations in the vertical and horizontal direction.

The fixing system of 2-dimensional vibration (FS2DV) has been designed for fulfilling this concept. The FS2DV consist of the vertical and horizontal voice coil actuators with spring systems along action of each actuator.

We have the developed FS2DV with usage range frequency of 150…250Hz, amplitude 10μm. The system can be properly used with cutting force (up to 10 N) and any angle (from 0 to 90°) by selecting appropriate rigidities for the vertical and horizontal spring systems.

Finally, we observe the deviation of the thrust force. The trust force is deviating during the vibration process with amplitude up to 1.3 N and frequency of the workpiece's vibration.

論文の審査結果の要旨

本論文は，難削材料に対する微細深穴あけ技術の実用化を目的とし，加工対象物の低周波振動加振技術の開発に関する論文である．

直径０．２mm以下ときわめて小径でかつ板厚と穴径の比であるアスペクト比が２０を超すような微細深穴をドリル加工する際には超音波振動加振（４０ｋＨｚ）する技術と並んで，数１００Ｈｚ以下で１０μm程度の低周波振動を付加する技術も工具の長寿命化，ステップ量の増加による加工時間の短縮などに大きな効果があることが南部等の研究により明らかになっている．超音波加振と低周波加振を併用するとさらに効果が増すことも提案されている．南部等はまた工具回転数，切り込みなどのドリル加工条件に合わせて低周波振動における周波数，振幅を適切に選択することでその効果が大きく異なることも明らかにしている．ところが，実用の一例であるディーゼルエンジンの燃料噴射用ノズル穴加工においては，ノズル形状が曲面である上に，燃費効率向上を考慮した設計において斜め方向に穴あけする要求がある．前記した超音波加振は切削主軸に与えるとすると，低周波加振はチャック上に固定された耐熱合金製ノズルにおいて実現する必要がある．また，その加振装置は加振方向や加振周波数を可変にする必要がある．本論文はこの２次元加振を実現する方法に関する研究である．

第１章では，前記した研究背景や低周波振動付与が微細穴加工の加工能率向上や工具寿命の増進に寄与すること，低周波振動の周波数や振幅を適切に選定することが重要であることについて述べている．

第２章では，本研究の目的である２次元振動を付与することの意義について論じている．

第３章では，筆者が開発したFixing system for 2-dimensional vibration（ＦＳ２ＤＶ）について述べている．初めにＦＳ２ＤＶの設計指針について言及し，加振方法としてボイスコイルアクチュエータとばねを組み合わせた方法を用いること，パッシブ制御で２次元加振を実現する方策を採用したこと，工作物保持機構として３つ爪チャックを用いること，３つ爪チャックを保持するインターナルカラーと工作機械に固定するアウターカラーとの間にばね要素を持たせることにしたこと，カラー間の梁構造により鉛直方向の振動を可能にするようにしたこと，インターナルカラーと３つ爪チャックの間に皿ばねを介することにより水平方向の振動を可能にするようにしたこと，２つのボイスコイルアクチュエータを１つのドライバ回路で駆動し出力を抵抗分割で調整することにより任意の振幅比を実現する方式を採用することにしたこと，を述べている．

ばね定数は鉛直方向については梁形状板ばね部材の形状及び個数を変えることにより，水平方向については皿ばねの個数及び相互の組み合わせ方法を変えることにより調整可能にしている．

任意のばね定数で加振した場合に鉛直方向と水平方向の剛性が異なると，ドリル加工の際の切削力に起因するスラスト力により位置偏差が生じ加工位置精度を確保できなくなる怖れがある．本論文では，任煮の周波数において鉛直・水平両方向の剛性が等しくなるようにばね定数を決定する手法を提示している．

第４章では開発した装置の特性を評価している．ディーゼルエンジンの燃料噴射ノズル形状を模した半球状のテストピースに対して，傾斜穴を想定して１５°，４５°，７５°方向に加振した時の変位を鉛直・水平双方それぞれについてレーザ変位計を用いて計測している．加振周波数は１５０Ｈｚ，２００Ｈｚ，２５０Ｈｚについて調べている．それぞれの加振周波数に対し，位置剛性を８００ｋＮ／m，１２００ｋＮ／m，

１６００ｋＮ／ｍで対応させている．加工により生じたスラスト力の影響を評価するために，加工点で加工方向に３Ｎ，７Ｎ，１０Ｎで押しながら加振したときの変位特性を求めている．
振動方向，周波数，加圧力のパラメータを変化させたいずれの条件においても，所望した方向に１０μｍの振幅での振動が生起していることを確認している．
振動波形のヒステリシスを評価し，位置ずれは１μｍ以下となり必要精度の６μｍを満足していること，穴径拡大量は２．１～３．７μｍで穴径２００μｍに対して十分小さいことを明らかにしている．

第５章ではスラスト力の変動について評価している．ＦＳ２ＤＶの保持部に動力計を配置し，ねじ式の加圧棒で試料傾斜面を押しながら，加振時の工作物変位と発生応力を計測し，スラスト力の時間偏差を評価している．偏差は最大０．４Ｎ程度であり，微細穴ドリル加工時に生じると想定されるスラスト力９Ｎ程度に較べ十分小さいことを明らかにしている．

第６章では本研究のまとめと結言を述べている．

本研究により，任意方向に低周波振動（数１００Ｈｚ前後）を与える手法を開発し，切削主軸の超音波振動加振と併用することによりＬ／Ｄ比２０以上，穴径０．２ｍｍ以下の微細深穴加工における工具折損防止・工具長寿命化及び加工時間の短縮を実現できることになり，低周波振動付加穴あけ技術の実用化に向けて大きな課題を解決したと言える．工学的のみならず実用的にも価値のある研究と言える．本論文の成果については，２編の論文が学術誌に掲載されている．

以上を鑑み，審査委員会は博士（工学）の学位に十分に値すると判断した．