

氏 名	ROY BIPLOV KUMAR
博士の専攻分野の名称	博士（学術）
学 位 記 号 番 号	博理工甲第 1204 号
学位授与年月日	令和 3 年 3 月 25 日
学位授与の条件	学位規則第 4 条第 1 項該当
学 位 論 文 題 目	Development of simulation method of the spinning process for cylindrical to hemispherical shape of aluminium alloy at room temperature (アルミニウム合金の円筒から半球形状への室温スピニング加工のシミュレーション方法の開発)
論 文 審 査 委 員	委員長 教 授 荒居 善雄 委 員 教 授 蔭山 健介 委 員 教 授 荒木 稚子 委 員 准 教 授 坂井 建宣 委 員 オハイオ州立大学准教授 Yannis P. Korkolis

論文の内容の要旨

Tube spinning is an efficient and steady method of incremental metal forming processes, which are widely used to produce near net shape symmetrical products using the action of rollers that stretch and compress a tube /specimen through consecutive stages. It is one of the best methods for complex shape product manufacturing, such as hemispheres, cones, oblique, cylinder, and combinations of these shape configurations. The spinning procedure strategy involves selecting several process parameters such as product diameter, thickness and material, roller path profiles and passes, roller shape, axial feed rate, radial feed rate, spindle speed, etc. These process parameters play an essential role in the successful manufacturing of desire products with the desired thickness. For the section of proper process parameters need a lot of trial and error analysis. In order to understand the material deformation mechanics and the effect of process parameters on tube spinning, many aspects of the process have been investigated to-date. The virtual manufacturing concept needs to develop to improve production efficiency, which is now one of the most effective methods of minimizing processing time and improving the goods' quality. Numerical simulation of incremental tube spinning processes as part of the virtual production phase significantly reduces the lead time.

High precision is essential for space products because the thickness uniformity directly connects with the vessel's strength and weight reduction. Thickness changes in the specimen during spinning pass operations play a vital role in forming processes. It is becoming more critical to control thickness changes

to optimize the following processing route and produce an efficient product. The study aims to develop a simulation modelling method based on establishing process parameters, identifying the formability limits, and understanding the deformation mechanics to produce qualitatively operative miniaturized components necessary in real production time. Since the vessel is formed in several continuous spinning passes, it is difficult to experimentally determine the effect of different process parameters on the shape and thickness changes. Finite element (FE) analysis is a useful tool for estimating the thickness and shape change due to the roller action throughout spinning. The FEA model ability for the thickness change evolution of the specimen during spinning would significantly reduce the process schedule's cost and production time. The reliable and detailed quantification of deformation mechanism and real-time thickness evaluation has the potential to support the pathways and manufacturing strategies of the proposed production technique and the overall performance of the product.

The research is conducted different phases though a collaboration work with industrial and academic. This research first phase is based on a series of experiments and numerical analyses on thin cylinder large diameter tubes, with a diameter to thickness ratio is 144. Generally, this process is done by hot spinning using moderate strength materials such as AA6061-T6. Here, cold spinning was performed on annealed material AA6061-O, a soft material, as a first way of validating numerical and material modelling, including forming limits. About forty passes are needed for producing the full hemispherical shape. However, in this study, up to eight passes are considered for the spinning process's experiment and simulation, as the tube wrinkled severely after that. Spinning are interrupted at four stages: after pass 2, pass 4, pass 6, and pass 8, obtaining partial hemispherical shapes. Local strain measurements on the spun tube in different spinning passes were also accomplished by a scribed grid inside tubes before spinning. The purpose is to understand the deformation after every roller pass, measure the shape and thickness change, and compare it to simulations. Since tube spinning simulations involve large strains, the pre-necking true stress-strain curve obtained by the tensile test is not enough. For obtaining the actual material response after maximum load, the identification of the hardening response of materials at large strain is described. Due to the complex, incremental plastic forming in tube spinning and the very time-consuming simulation by fully-3D methods, axisymmetric modelling was firstly evaluated. The ability and limitation of an axisymmetric FE model as a prediction method of the final shape and thickness in mandrel-free, multi-pass tube spinning is examined through simulations and experiments. Furthermore, the effects of roller pass number on shape and wall thickness and the stress and strain distributions are discussed. After that, the 3D model with different types of elements is developed for predicting wrinkle. A comparison of axisymmetric and 3D modelling on the deformation mechanism is also described. This process's deformation mechanism is explained by analyzing the history of plastic strain on an element of the numerical model.

This research second phase is based on a series of experiments and numerical analyses on small diameter with different diameter to thickness ratio ($d/t = 50$ and 34). The purpose is investigation of the forming of hemispherical shape from pure aluminium at room temperature by mandrel-free multi-pass linear spinning

pass and understanding process parameters' effect. The experiments were conducted mandrel- free tube spinning for large deformation (diameter reduction 70%) with different process parameters and have measured the evolution of shape and thickness during the process. This study focuses on the fundamentals of finite element flow formulation to the main aspects of computer implementation and modelling of three-dimensional tube spinning processes. Significant research and development are based on a comprehensive analysis of a wide range of FE (Finite element) modelling such as selecting solution procedures, model elements, meshing, contact algorithm procedures. Besides, to clarify the capability of virtual tools prediction in shape and thickness, three different finite element models (using axisymmetric, shell, and solid elements, respectively) are developed and compared the prediction results with the results of the experiments. The results found that the axisymmetric model offers very good first estimates of the tube response to the process parameters. The shell element model is much slower but not much more accurate. Finally, the solid element model is only slightly slower than the shell but offers the best to predict shape and thickness. The analyses exposed that specific processes are preferable for obtaining more satisfactory products depending on the workpiece geometry and dimensional properties.

This research demonstrates that the axisymmetric model is the most feasible FEA model for the shape and thickness changes during multi-pass, mandrel-free tube-spinning. For the existing case, the shape's prediction accuracy is ~99 %, the thickness change ~98%, and the plastic hoop strain ~92%. Among the axisymmetric, shell and solid element model, the solid element model successfully predicts all aspects of the plastic deformation during tube-spinning, including the shape and thickness that result under different process parameters. The shell element model cannot capture well the effect of axial feed-rate on the resulting shape and thickness; instead, it overpredicts both. This might be due to its fundamental assumption of zero out-of-plane loading. The solid element model is about 500 times slower than the axisymmetric one and about 2 times slower than the shell one. The FEA models can provide a distinct insight into the tube-spinning process. The stress and strain distributions are highly localized under the roller contact, and that the stress components are compressive for the most part. The maximum compressive stress is in the thickness direction; the stress and strain distributions show a considerable increase locally, over ± 5 degrees along the circumferential direction and ± 5 mm along the tube's longitudinal direction under the roller contact. The strain-rate distribution is highly localized near the roller contact region. The highest value is observed beneath the roller at the middle of the spinning pass is around 90 /s. The plastic strain gradually increases, attaining a maximum value of over 12 at the tube's free end. The effect of the friction coefficient between the roller surface and the workpiece surface is minimal for the outer shape of the spun tube but somewhat more significant for its thickness. The optimal precision of process numerical predictions should control the necessary degree of model sophistication.

In conclusion, the research describes a combined numerical/experimental effort to develop simulation

method of complex production process conducted by the collaboration industrial and academics. The intent is to develop a realistic virtual method for selecting spinning process parameters. A trial basis target shape is selected to examine the virtual capability of shape and thickness prediction. Material tests and material parameter estimation approaches are established. Precise prediction of product geometry (shape and thickness) depends on the future development of fast, accurate FEA models. As future work, to ensure the optimum process parameters for producing a smooth product with high quality in addition to select the proper spinning path for designing target shape.

論文の審査結果の要旨

本論文の審査委員会は令和3年2月10日に論文発表会を開催し、論文内容の発表及びそれに引き続いた質疑応答、論文内容の審査を行った。審査結果の要旨は以下のとおりである。

本学位論文は、アルミニウム合金の円筒から半球形状への室温スピニング加工のシミュレーション方法の開発に関するものである。以下に各章の内容について概要を述べる。

第1章「緒言」では、スピニング加工のシミュレーション方法に関する過去の研究を概観し、本研究の目的についてまとめて述べている。スピニング加工は、ローラーを材料に押し当てて軸対称形状な最終形状に近い形状に加工する効率的な金属加工法の一種であり、広く利用されている。スピニング加工は、半球や円錐・円筒やそれらを組み合わせた部品形状に加工するには最適な加工方法である。スピニング加工では、製品直径と肉厚、材料、ローラー経路、ローラー形状、軸方向送り速度、半径方向切込み量、回転速度などが加工パラメータとなる。これらの加工パラメータは製品の最終形状や肉厚の品質を決定づける重要なものであり、その決定には多くの加工試験による試行錯誤が必要である。スピニング加工において、その変形の力学を理解し、加工パラメータが最終製品の品質に及ぼす影響を明らかにするために、現在までに多くの研究がなされてきた。製品開発時間を短縮しつつ高い品質を得るためには、仮想的な加工における加工パラメータの最適化を行う必要がある。スピニング加工の数値シミュレーション技術も、こうした仮想的な加工の一種であり、製品開発時間を短縮することが期待されている。以上より、本研究の目的を、円筒から半球形状への複数パススピニング加工の有限要素法によるシミュレーション方法を開発すること、としている。

第2章「文献調査」では、スピニング加工のシミュレーション方法に関する複数の方法論を、特に有限要素法による加工のモデル化と大変形を生じる場合の材料モデル化に注目して、比較・考察している。また、スピニング加工における欠陥の発生に関する研究を展望している。

第3章「有限要素モデリングの基礎」では、本研究で用いる大変形有限要素モデルと弾塑性材料モデルおよび動的接触問題の解法アルゴリズムについて述べている。さらに、材料試験におけるくびれ解析を実験結果と組合せ、大ひずみ範囲の加工硬化特性を逆問題的に同定する方法と、その結果について述べている。

第4章「円管スピニング加工の軸対称モデル化」では、アルミニウム合金 6061-O の大口径薄肉管を用いて円筒から半球への室温スピニング加工実験と、軸対称モデルを用いたシミュレーションを実施し、軸対称モデルの有効性について述べている。スピニング加工の軸対称モデルは、円筒の大変形軸対称弾塑性解析により、その形状と肉厚および塑性ひずみを工業的に有用な精度で、効率良く予測出来ることを、実験結果との比較によって示している。軸対称モデルは、加工領域の大部分において、加工パス数の増加による肉厚の増加を予測出来ている。さらに、加工による塑性ひずみの実測結果とシミュレーション結果を比較し、軸対称モデルの有効性を示している。また、シミュレーションによるパラメータ解析により、ローラーと材料の摩擦係数が肉厚変化の予測に及ぼす影響が大きいことを示している。しかし、軸対称モデルはローラーの折り返し点における急激な肉厚変化を精度良く予測出来ているとは言えない。そのメカニズムを考察し、実験ではローラーが単一の位置で接触し、その材料が回転することで全周が加工されるのに対して、軸対称モデルでは、全周が同時に圧縮されることから生じる応力・ひずみ状態の差異が原因であることを述べている。

第5章「円管スピニング加工の3次元モデル化」では、純アルミニウム 1070-O の比較的直径/肉厚比の小さい円管を用いて円筒から半球への室温スピニング加工実験と、3次元モデルと軸対称モデルを用いたシミュレーションを実施し、各シミュレーションモデルの精度と有効性について述べている。3次元立体要素、3次元シェル要素、軸対称要素を用いてシミュレーションを行い、実験結果と比較して、各要素のメリット

とデメリットを考察している。スピニング加工実験では、直径の大きな減少により肉厚は大きく増加するが、軸方向送り速度は肉厚の増加量に大きな影響を及ぼすこと、ローラーの折り返し点が製品形状どおりであっても、加工パラメータとローラー経路の選択によっては、円筒に軸方向座屈を生じることを述べている。3次元立体要素、3次元シェル要素、軸対称要素を用いたシミュレーションは、それぞれ最終形状の再現精度が異なること、3次元立体要素を用いたシミュレーションは形状と肉厚の予測精度が最も高く、製品の最終形状の確認には必須であるが、現状の計算機能力では莫大な計算時間が必要であること、形状と肉厚の予測精度は劣るもののローラー経路設計の試行錯誤段階では軸対称要素を用いたシミュレーションが有用であること、3次元シェル要素を用いたシミュレーションはその面外応力成分がゼロであることから形状と肉厚に予測精度は3次元立体要素を用いたシミュレーションに比べて劣ることを述べている。

第6章「しわ発生の予測と防止」では、アルミニウム合金 6061-O の大口径薄肉管と純アルミニウム 1070-O の比較的直径 / 肉厚比の小さい円管を用いて行われた円筒から半球への室温スピニング加工実験における円周方向と軸方向のしわ発生に着目し、その発生と拡大について実験とシミュレーションを組合せて検討し、その予測方法と防止方法を提案している。アルミニウム合金 6061-O の大口径薄肉管の円筒から半球への室温スピニング加工では、加工初期から開口部に円周方向の微小なしわが発生し、パス数の増加に伴い拡大していくことが実験的に明らかにされ、3次元立体要素を用いたシミュレーションはこの現象を再現出来ることを示している。シミュレーションにおいて、しわ発生とローラー反力の減少が対応しており、加工中におけるしわ発生検知の可能性が示唆されている。また、仮想的に材料特性を変更することにより、降伏応力の低下が最もしわ発生防止に適していることを示している。純アルミニウム 1070-O の比較的直径 / 肉厚比の小さい円管を用いた円筒から半球への室温スピニング加工では、ローラー経路が軸方向しわ発生を支配する因子であることが実験的に示され、3次元立体要素を用いたシミュレーションはこの現象を定量的に再現出来ることを示している。シミュレーションにおいて、半径方向切込み量が軸方向しわ発生を支配しており、ローラー経路に最適化により軸方向しわを防止可能であることを示している。

これらの研究成果については、すでに、以下に示す2編の原著論文として国際的な学術雑誌に発表されている。

- [1] Biplov Kumar Roy, Yannis P. Korkolis, Yoshio Arai, Wakako Araki, Takafumi Iijima, Jin Kouyama, Experimental and numerical investigation of deformation characteristics during tube spinning, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2020) 110,1851-1867
- [2] Roy, B. K., Korkolis, Y. P., Arai, Y., Araki, W., Iijima, T., & Kouyama, J., A study of forming of thin-walled hemispheres by mandrel-free spinning of commercially pure aluminum tubes, Journal of Manufacturing Processes, 64 (2021) 306 - 322.

また、以下に示す2編が全文査読付きの国際会議論文として採択されている。

- [1] Roy, B. K., Korkolis, Y. P., Arai, Y., Araki, W., Iijima, T., & Kouyama, J. (2018) . Experiments and simulation of shape and thickness evolution in multi-pass tube spinning. In Journal of Physics: Conference Series (Vol. 1063, No. 1, p. 012087) .
- [2] Roy, B. K., Korkolis, Y. P., Arai, Y., Araki, W., Iijima, T., & Kouyama, J. (2019) . Experimental and finite element investigation of wrinkling during spinning of a thin-walled tube. NUMIFORM 2019: The 13th International Conference on Numerical Methods in Industrial Forming Processes.

学位論文審査委員会としては、本論文が博士（学術）の学位を授与するに十分値するものと判断し、合格と判定した。