

◇ 砥粒加工学会技術賞 紹介記事 ◇

主軸台移動形 CNC 自動旋盤 CincomL32
残材削減機能搭載機の開発Spindle Base Traverse Type CNC Automatic Lathe CincomL32
development of machine with residual material reduction function鈴木敏之*1, 中谷尊一*1, 御園晴彦*1, 大和久祐樹*1, 北風絢子*2, 田中秀岳*3
Toshiyuki SUZUKI, Takaichi NAKAYA, Haruhiko MISONO, Yuki OHWAKU,
Ayako KITAKAZE and Hidetake TANAKA

Key words : automatic lathe, friction welding, tensile strength, Taguchi method, aluminum alloy, joint, remnants, bar material, environment

1. 緒言

近年,世界的な消費の拡大や不安定な社会情勢,為替の変動などから材料価格の高騰が続いている.製品価格への転嫁も容易ではないことから多くのモノづくり企業においては材料費を抑えることが重要な課題となっている.またカーボンニュートラルなどSDGsの観点からも生産に使用される材料を減らし,CO₂の削減に取り組むことは重要であり,世界中の企業の動向が注目されている.そうしたなか,我々は,スイス型自動旋盤で生じてしまう加工できずに残ってしまう素材すなわち“残材”に着目し,これを削減すべく旋盤における摩擦接合技術を開発,さらにこれを応用した残材削減機能を開発しスイス型自動旋盤に組み込んだ¹⁾.

スイス型自動旋盤は小径長尺の棒材を高精度,高効率に加工するために考案された旋盤であるが,その独特な機構のために残材が多いという長年の課題を抱えている.自動旋盤上で摩擦接合を行い,残材と次に供給される新材を接合することで残材からもワークを生産(加工)できるようになり,残材削減が可能になる.

摩擦圧接は機械的な回転エネルギーによる摩擦熱とスラスト荷重によって材料を接合する技術であり²⁾³⁾,一般的に摩擦圧接機で実施されている.自動旋盤も材料に対する回転機構とスラスト駆動部を持つ点は共通しているが,摩擦圧接機は強力なスラスト荷重を發揮できる機械構成とそれに耐える剛性をもっていることや,制御できるパラメータが異なるといった相違点がある.そのため,自動旋盤上で摩擦圧接を行うには自動旋盤に適した機構の追加や圧接条件が必要となる.本稿では,摩擦圧接による残材削減機能を実現した自動旋盤の詳細や,自動旋盤に適した接合条件の傾向把握と最適化の試みについて紹介したい.

2. 摩擦圧接法

2.1 摩擦圧接法の特徴

摩擦圧接法は,接合する2つの母材を突き合わせ加圧し,接合面を摩擦することで加熱して圧接する固相接合の1つである.50年以上前に開発された接合方法であり,その歴史は長く信頼性の高さから自動車,建機,油空圧,工具をはじめさまざまな産業分野に導入されている.摩擦圧接の長所としては,他の接合と比べて接合時間が短いため生産性が良いこと,接合強度および繰返し精度が高いことなどがあげられる.金属材料だけでなく,プラスチックに対しても容易に適用でき,異種材に対しても可能である.一方,短所としては摩擦熱および接合圧力による接合部および近傍の材質特性の変化がある.

2.2 摩擦圧接法の工程

図1は摩擦圧接の一般的な工程を示しており,以下の順で接合が行われる⁴⁾.

- (1) 少なくとも一方の材料を所定の回転数で回転させながら,摩擦推力 P_1 で接合面を押し当てる.
- (2) 摩擦熱により接合面周辺が高温になり軟化する.軟化した材料が推力によりバリとして排出され始める.
- (3) 材料端部の酸化被膜や汚れがバリとともに排出され清浄面同士の接触が行われるようになる.清浄面同士が十分接触するようになったら,回転を停止し,推力をさらに大きくしたアプセット推力 P_2 を加え,接合を完了する.

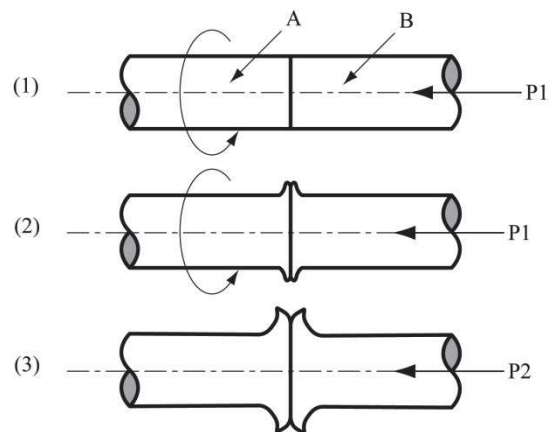


図1 摩擦圧接の一般的な工程

*1 シチズンマシナリー株式会社:〒359-0001 埼玉県所沢市下富840

*2 シチズン時計株式会社:〒359-8511 埼玉県所沢市下富840

*3 上智大学〒102-8554 東京都千代田区紀尾井町7-1

(学会受付日:2023年 2月10日)

3. 摩擦接合技術を活用した残材削減機能

3.1 自動旋盤の課題である残材

旋盤の中で特に小径長尺の加工を得意としているスイス形自動旋盤では、図2に示すように、材料を案内するためのガイドブッシュ装置があることで材料全体の1~2割が加工できない「残材」となってしまう。残材は日々大量に回収されており、最終的にはスクラップとして安価で引き取られるか廃棄処分されている。とくに自動旋盤では高精度な加工を行うため曲がり小さく寸法公差の安定した研磨材が多く使われることから、付加価値の高い材料の購入価格とキロ単価で売買されるスクラップに大きな価格差が生じる。このため、残材を削減できれば環境負荷低減と同時にコスト削減の効果も期待できる。

3.2 残材削減機能

一般的な自動旋盤の機械稼働では、材料が短くなりこれ以上上部品の加工ができなくなると材料交換動作が実行される。残材削減機能を搭載した自動旋盤では通常の自動旋盤における材料交換のタイミングに材料の接合を行う。残材と次に供給される新材を摩擦圧接で接合し残材を新材同様に加工することを一連動作にて可能にしており、残材削減機能によって従来の200mm~300mmほどの残材を5分の1程度にまで短縮する(図3)。また、今回新規に開発した接合クランプ装置により材料を強固にクランプすることが可能となり、摩擦接合時に材料滑りのない最適な接合圧力を付加することで、良好な接合品質を実現した。

摩擦圧接では材質、材料径サイズ、端面形状により回転数や送り速度、寄り代などのパラメータが異なるため良好な接合品質を得ることのできる最適な圧接条件の設定が必要である。よって自動旋盤の能力に適した圧接条件を見つけ出さなければならない。そこで当社ではステンレスや銅合金、アルミ合金などの代表的な材料のほか、インコネルなどの特殊合金鋼やチタン、エンジニアリングプラスチックについて多くの接合テストを自動旋盤で行い、圧接条件に関する独自のデータベースを作成しノウハウを蓄積・活用している⁵⁾。自動旋盤における圧接条件の検証実験については、具体的な例を後述する。

接合によって生成された接合部は、摩擦熱や接合圧力により材料硬度や伸び、材料組織が変化するため通常製品には使用できない。このため、接合部が製品内に混入しないよう予め機械側で接合位置を算出しておき、残材からの部品加工が完了すると、熱影響範囲を含む接合部を切り落とす機能も組み込んでいる。

以下に、残材削減機能の工程を説明する(図4)。

- ① 投入した材料(新材)からの加工が完了。
- ② 材料切れを機械へ通知。(この時点で機内には残材が残っている状態)
- ③ 残材をガイドブッシュから引き抜く。
- ④ 新材を機械へ投入。
- ⑤ 残材と新材を摩擦圧接により接合する。
- ⑥ 摩擦圧接により発生したバリを切削加工で除去する。

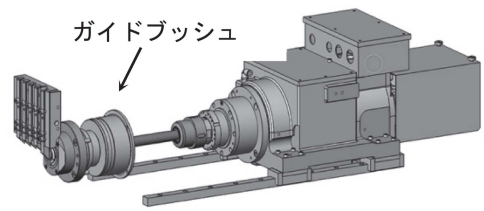


図2 スイス形自動旋盤

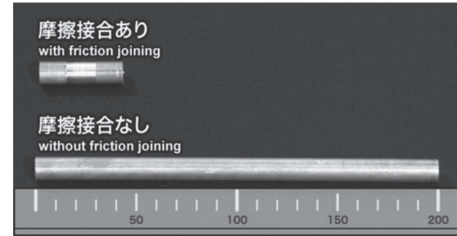


図3 残材長の比較

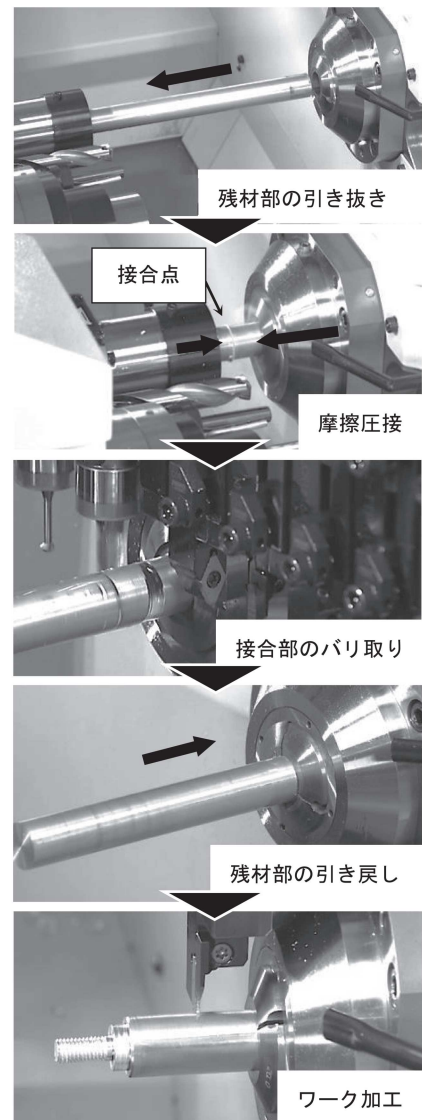


図4 残材削減機能の工程

- ⑦ 主軸が後退しガイドブッシュ内へ接合された材料を引き戻す。
- ⑧ 残材部からの加工を開始する。
- ⑨ 残材部からの加工が完了後、不要な接合部を切断する。
- ⑩ 新材から加工を開始。

残材削減機能の一連動作は前述のように複数の工程があり、残材長や接合部の位置、残材から加工可能なワーク数の算出なども必要となるため複雑になる。しかし、本開発ではいくつかの専用 G コードと引数(工作機械のプログラムコードとそのパラメータ値)を新たに開発し、それらを加工プログラムに組み込むことで、簡単に残材削減機能を実現できるようにした。

4. 自動旋盤による摩擦圧接条件の最適化実験

4.1 自動旋盤における専用条件の必要性

摩擦圧接では材質、材料径サイズ、端面形状により、回転数や送り速度、寄りしろなどのパラメータが異なる。良好な接合品質を得るためには、最適な圧接条件の設定が必要である。摩擦圧接機を用いる場合であれば過去の知見から条件を設定できるが、自動旋盤と摩擦圧接機では機械構造や制御因子が異なるため、従来の圧接条件を転用することはできない。自動旋盤に適した圧接条件が必要であり、その条件は材質や材料径によって異なる。

ここでは、Al-Mg-Si 系のアルミ合金 A6061 において行った接合条件最適化実験を紹介する。

4.2 実験条件および実験方法

実験に用いた A6061 の物性について表 1 および表 2 に化学成分、機械的性質をそれぞれ示す。試験片寸法は、直径 10mm、長さ 75mm とした。

まずは、自動旋盤における各制御因子が接合強度へ及ぼす影響の傾向を把握するため、水準をできる限り広く設定して実験計画法に基づいた L18 直交表実験を行った。水準条件を表 3 に示す。

自動旋盤における摩擦圧接法の制御因子は、回転数、摩擦寄りしろ、摩擦送り速度、アプセット寄りしろ、アプセット送り速度、アプセットタイミングの6つの因子とした。アプセットタイミングは各回転数において主軸が完全に停止する時間をあらかじめ測定し、その時間を0として定めた。

接合後、接合した材料に対し引張試験を行った。引張試験を行う際はJIS金属引張試験片規格14A号に則った形状とし、旋削加工で作成した。接合前の母材の引張強度試験を行った結果、引張強度は319.8MPaであった。試験装置は万能試験機⁹⁾を使用し、試験速度は3mm/minで測定した。

4.3 直行表実験結果

引張強度の要因効果図を図5に示す。アプセットタイミングは他の制御因子と比較して傾きが大きいことから、接合強度を向上するために重要な因子であるとわかる。さらに、アプセットを開始する時間が早くなるにつれほぼ線形に引張強度が高くなることが見て取れる。アプセット送り速度が大きいと引張強度が高くなることと合わせて考察するに、摩擦工程によって

表 1 A6061 の化学成分(%)

Material	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	
	0.40-0.8	less than 0.7	0.15-0.40	less than 0.15	0.8-1.2	
A6061-T6	Cr	Zn	Ti	Other		Al
				Individual	Sum	
	0.04-0.35	less than 0.25	less than 0.15	less than 0.05	less than 0.15	Re

表 2 A6061 の機械的性質

Material	Tensile strength	Yield strength	Elongation	Young's modulus	Poisson coefficient
	MPa	MPa	%	GPa	-
A6061-T6	more than 290	more than 240	more than 8	68.6	0.34

表 3 摩擦圧接の水準条件

Level	Rotational speed min ⁻¹	Friction		Upset		
		Burn-off length mm	Feed mm/min	Burn-off length mm	Feed mm/min	Timing s
1	8000	1.0	30	0.5	40	-0.5
2	6000	1.5	20	1.0	60	0
3	4000	2.0	10	1.5	80	0.5

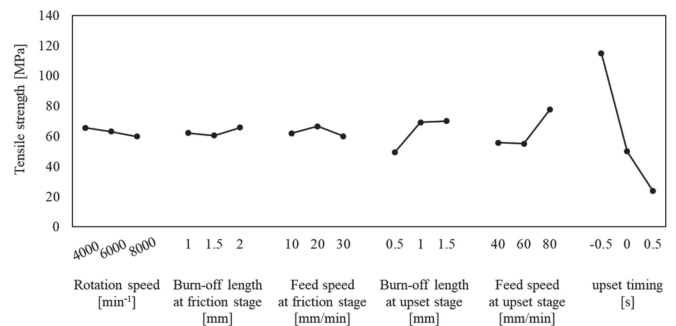


図 5 引張強度の要因効果図

形成された高温層が冷める前にアプセット工程へ移行することが、接合に至らしめる重要な要素であると思われる。一方で摩擦工程に関する制御因子、回転数、摩擦寄りしろ、摩擦送り速度はどれも傾きが小さくほぼ横ばいである。つまり、摩擦工程は引張強度に対して影響をあまり及ぼさないことを示している。そのためアプセットタイミングはNCコントローラの処理速度に依存する最速条件とした。

4.4 引張強度とアプセット圧力

図6に示すように、回転数を1000~8000min⁻¹までの5つに区切り回転数の効果を比較する条件に加え、回転数4000min⁻¹におけるアプセット圧力の効果を比較する条件で、接合実験及び引張強度試験を行った。アプセット圧力は、独自に作成した治具を用いてロードセルで測定した推力を、材料断面積で除して求めた。アプセット送り速度やアプセット寄りしろ、回転数による材料軟化具合によって、アプセット圧力は変化する。回転数以外の条件は表3に示した条件と同一のものを使

用し、アプセット寄りしろは1.5mmとした。

回転数とアプセット圧力には負の相関が見られ、引張強度とアプセット圧力に対しては正の相関が見られた。しかし、アプセット圧力が高まるにつれてアプセット圧力の増加量に対する引張強度の増加量は鈍化した。また、アプセット寄りしろが3mmの条件では、サーボモータの許容出力を超えアラームとなった。使用した旋盤に搭載されたモータでは、現在の摩擦条件においてこれ以上のアプセット圧力を付加することはできない。以上の2点よりアプセット送り速度と回転数による引張強度の向上は限界に達した。

4.5 引張強度と摩擦寄りしろ

次に、摩擦入熱を小さくすることによるアプセット圧力向上、および引張強度向上を図った。アプセット圧力は入熱量の影響を多大に受ける。入熱が大きくなると材料軟化が促進され、圧縮荷重が分散されることでアプセット圧力が小さくなる。このため、アプセット工程における軟化層が薄くなれば、接合面へのアプセット圧力向上が期待できる。

回転数を4000min⁻¹で固定し摩擦寄りしろに水準を設けることで入熱量を制御する。摩擦寄りしろによる引張強度への効果を測るためには、摩擦工程の影響を受けて変化するアプセット圧力が一定になるように、摩擦寄りしろの条件に合わせてアプセット条件を適切に設定しなければならない。今回はアプセット工程のZ1サーボ出力が限界値近くとなるようにアプセット寄りしろを設定した。実験結果を図7に示す。実験結果より、摩擦寄りしろが設定した最小の条件では引張強度のばらつきが大きく安定しない接合結果となった。隣接した摩擦寄りしろ条件では今回の条件内および本研究内で最高の接合強度を示しており、ばらつきも小さい。上述の二点に加え、摩擦熱を利用するという接合原理を考慮すると、今回の条件において設定した最小摩擦寄りしろは接合可能な入熱量の下限値であると思われる。

以上により、A6061の自動旋盤における適した接合条件の傾向、およびCincomL32での最適圧接条件が求まった。

5. 結言

摩擦圧接法を組み込むことで残材削減を可能にしたスイス型自動旋盤の開発について紹介した。

将来的には摩擦接合技術を残材削減に用いるだけではなく、自動旋盤による接合ワークの製造そのものにも適用していきたいと考えている。具体的には、異種金属が接合された部品や中空部品、径寸法差が大きい部品、等である。環境的側面では、中空部品はEVなどで求められる部品軽量化に貢献でき、径寸法差があり切削体積が大きい部品は小径部と大径部を接合することで材料削減が可能になる。

今後もこうした新しい取り組みの開発を継続し、社会貢献につなげていきたい。

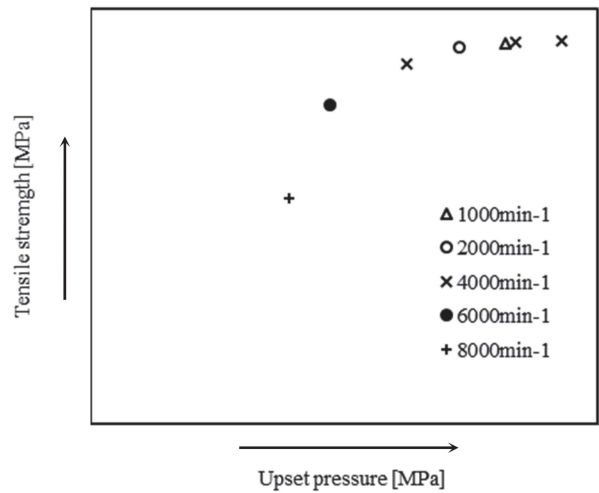


図6 引張強度とアプセット圧力および回転数の関係

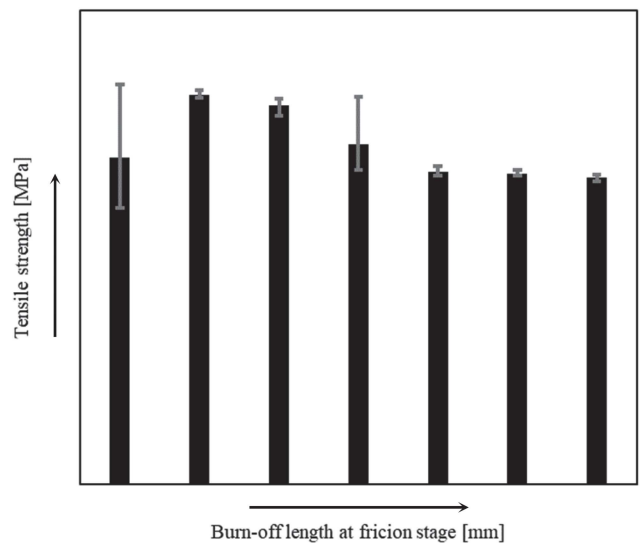


図7 引張強度と摩擦寄りしろの関係

6. 参考文献

- 1) 鈴木敏之: 主軸台移動型 CNC 自動旋盤シンコム「L32」, ツールエンジニア, 9(2022), 16.
- 2) 川口翼, 辻野良二: 摂南大学融合科学研究所論文集, 摩擦接合技術, 2-1 (2016), 116.
- 3) 中村 虔一: 日本金属学会会報, 摩擦圧接の基礎的問題点, 5-3 (1966), 173.
- 4) 摩擦圧接協会: 摩擦圧接, コロナ社, (1979), 19-20.
- 5) 山本大雅, 田中秀岳: CNC 自動旋盤における引張強度に基づく摩擦圧接条件の最適化, 2021年度精密工学会学術講演会講演論文集, 191.
- 6) 島津製作所, AG-X plus 100kN: <https://www.an.shimadzu.co.jp/test/products/mtrl03/biaxial.htm>