

NACHI
**TECHNICAL
REPORT**
Materials

Vol. **35A2**
May/2019

マテリアル事業

■ 寄稿・論文・報文・解説

「摩擦攪拌接合ツール用材料の開発」

Development for Tool Material of Friction Stir Welding

〈キーワード〉 摩擦攪拌接合・FSW・マルチマテリアル・軽量化
電動化・アルミ・凝着・高温特性・異種材料接合

マテリアル事業部／技術部
船平 伸之 Nobuyuki Funahira

要 旨

摩擦攪拌接合(後に詳細説明)は、アルミ部材の接合技術として鉄道車両、航空宇宙、半導体製造装置部品などで実用化されている。また、アルミ部材のなかでも溶接が困難とされるアルミダイキャスト部材接合に展開されたことで、自動車部品への適用も増加している。これまで困難とされていたアルミ部材と、鉄や銅をはじめとする異種材料との接合が可能とされることから、次世代自動車部材の軽量化技術への展開が期待されている。

アルミ部材と比較して、軟化温度が高い鉄、銅、チタンなどとの接合においては、より高温強度の高いツール材料が必要となる。そのため、高温強度に優れた焼結金属やセラミック製ツール材料が研究開発されているが、摩擦開始時の冷間時の接触衝撃への対応、接合コストを含めた量産技術として展開するためには、最適な材料開発・選定が引き続き求められている。

NACHIマテリアル部門の特殊溶解と材料成分設計技術を活用し独自に開発した材料において、アルミ材との耐凝着特性や高温特性などに優れていることが確認されたことから、アルミ材と異種材料接合用ツールとしての特性検証をすすめた。

Abstract

Friction Stir Welding (of which detail is explained later) has been put into practical use for the welding of aluminum materials used in the trains, spacecrafts and the parts for equipment to manufacture semiconductors. The technology has increasingly been applied to the welding of automobile parts, since it was developed to weld the aluminum die-cast parts that were difficult to weld among aluminum materials. The technology enables the welding of aluminum to other different materials such as steel and copper, which has been considered difficult. Thus, Friction Stir Welding is expected to be used in the manufacturing of the lightweight parts for the next-generation vehicles.

Compared with the welding of aluminums, the welding of steel, copper, or titanium to aluminum requires the tool material with high-temperature strength since these metals have higher softening temperatures than that of aluminum. For this reason, the tool material made of sintered metal and ceramic with excellent high-temperature strength have been researched and developed. However, development and selection of the optimum material are continuously sought to achieve this method as a technology for mass-production that poses the dealing with the welding cost and contact shock in cooling at the beginning of friction.

Utilizing our own technologies of special melting and material ingredient designing from NACHI's material department, we have developed our own tool material. It was confirmed that the material excels in adhesion resistance to aluminum and high-temperature characteristics, so we proceeded with verification of material characteristics of the tool for the welding of the aluminum material to other different materials.

1.はじめに

摩擦攪拌接合(Friction Stir Welding: 以下FSW)は、専用ツールを回転させて工作物に押し当てることにより摩擦熱を発生させ、熱により軟化した材料をツール回転力により流動、混合させて接合する技術である。軟化した固体状態で接合することにより数々の利点が得られる。アルミ部材を接合するFSWツールは、アルミ部材の軟化温度および軟化時の材料強度に耐えるためSKD61をはじめとする工具鋼ツールが用いられている。

近年、自動車の電動化が急速に進展するなか、PCU・DC-DCコンバータをはじめとする電装部品・バッテリーなど電動化装備の積載量増加やさらなる低燃費要求により、車両の軽量化ニーズが高まっている。鉄製部材の全部または一部をアルミなどに置き換えるマルチマテリアル化のための接合方法として注目を集めている。

2. FSW技術の特長

FSWの特長を以下に示す。

- ①接合時の変形、ひずみの発生が小さい。
- ②溶接では接合ができない異種材料接合が可能。
- ③内部ブローホールなどの欠陥の発生が無い。
- ④スキルが不要なため熟練溶接工の必要が無い。

FSWは、専用ツールの回転による摩擦熱で軟化した材料を固体(融点以下)で流動させ接合する。ツール周囲のみ発熱することから①に示す極めて大きな利点が生まれる。

接合材を溶融させないことから、②の融点が大きく異なる部材でも軟化温度が近ければ接合することが可能となる。

ツールおよびツールの回転数、送り速度などの条件管理により、スキルを問わず③・④の特長を得ることができる。

FSWは、回転するツールが工作物中を移動するが、アーク溶接のようなフェウム、光の発生がなく、環境・安全面においても大きなメリットがある。

一般に接合部は熱影響を受け材料強度が低下することが多いが、FSWは、接合条件を管理することで組織制御を行ない、接合部の材料特性を改質、強度向上させることも可能となる。

FSWの概要図を図1に示す。

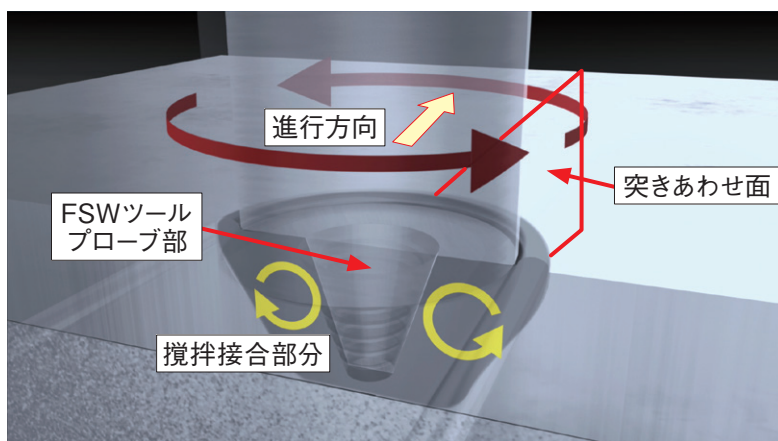


図1 FSW接合の概要図

3. FSWツール用材料開発

FSWツール用材料の必要特性を検討した。

- ①アルミ部材の場合、工作物温度が十分低い間は、ツールと工作物間において塑性加工・摩擦損耗が生じ、工作物温度が上昇すると、工作物のツール表面への凝着、工作物塑性流動によるかきとり作用による剥離を繰り返す。アルミ部材の合金種類により、ツール表面への合金成分の部分凝着が観察され、接合が不安定となる場合がある。ツール材特性として、アルミ合金成分の凝着特性に着目し、成分設計による解決をはかる。
- ②アルミ部材と異種材料(鉄、チタン、銅など)接合の場合、異種材料工作物側の軟化温度が重要となる。流動可能な軟化温度に到達するまでのツール強度不足による損耗・破損や、工作物軟化温度がツール材質の耐熱温度を超える場合などが考えられ、温度全域における高強度材料が必要となる。

室温および高温において異種材料に対する十分な高強度を有し、機械加工が可能な耐熱合金開発をすすめる。

NACHIが保有する特殊溶解設備を図2に示す。

これらの設備を含めた工程設計・成分設計により、今回評価した開発材の特性イメージを表1に示す。



図2 特殊溶解設備の概要(真空溶解炉)

表1 開発材の特性概念

開発材種名	特性概念
FS03	アルミ-アルミ接合用で耐凝着性を改善
FSX01	アルミ-異種材料接合で高温特性を改善

4. アルミ凝着特性評価

アルミ部材のFSWツール用材料としてSKD61の適用が報告されている。また一方で、工作物中で回転するプローブ周辺にアルミ合金成分の凝着が生じると、接合荷重が不安定になるとともに接合不具合が発生することが観察されている。

今回、アルミ合金成分の凝着性に対して、SKD61より優れた材料を開発することができたので、その評価結果を紹介する。

その評価条件を表2に、また接合評価の接合パターン、工作物クランプ状態を図3に示す。

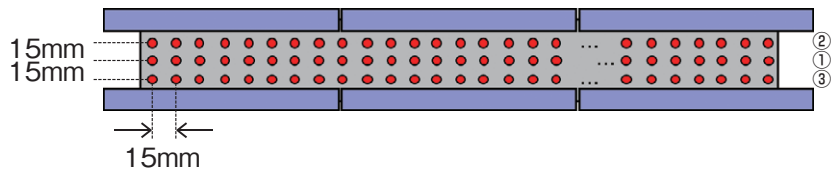
所定の評価条件で、アルミとアルミの重ねあわせ接合を行ない、使用前と3万打点完了後の写真を図4に示す。

SKD61ツールはプローブ周辺にアルミ合金成分の凝着が確認されるが、開発材種FS03はアルミ合金成分の凝着がほとんど観察されなかった。

表2 アルミ凝着特性評価条件

項目	内容(条件)
ツール材種	FS03(開発鋼種名)
	SKD61
試験方法	アルミ合金板重ねあわせスポット接合
工作物	A5083 板厚2.5mm
押込み深さ	3.3mm
ツール回転数	2,000rpm
押込み時間	3.6秒
接合(打点)数	30,000打点

打点位置



クランプ方法



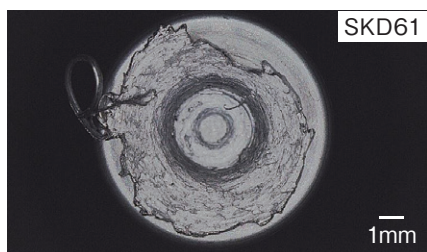
2セット(2枚重ね/セット) / 1段取り

図3 打点位置とクランプ方法

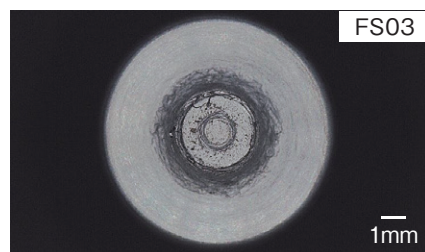


使用前

ツール上部から観察



SKD61 (30,000打点後)



FS03 (30,000打点後)

図4 凝着評価ツール(30,000打点評価)

5. 異種材料接合でのツール材種評価

アルミと鉄などの異種材料を接合する場合、例えば鉄に接触する側では赤熱することで、SKD61をはじめとする工具鋼ツールはツール材の軟化による著しい早期損耗が生じる。このとき、高温強度の高い超硬合金や焼結合金などのツール材質が使用されるが、とくに冷間時の欠損に対する信頼性に課題があり、ツール形状に制限を余儀なくされている。そのため、冷間および高温時の強度と、機械加工および塑性加工が容易であることを両立する材料が必要と考えられる。

硬さが高く、高温時の強度低下が小さく、機械加工が可能なFSX01を開発したので、各種の工作物に対するツール材種の評価を実施した結果を報告する。

評価は3材種(FSX01、FS03、SKD61)のツールをアルミ合金、純銅、SS400の単体工作物に押し込み後走行させるビードオン試験とし、走行時に荷重データを測定した。その評価条件を表4に示す。

ビードが安定したと考えられる4ビード目の最終10秒でのZ軸方向の最大荷重を図5に示す。ただし、SKD61ツールはSS400に対して早期摩耗によりZ軸荷重が低下したため、2ビード目の最大荷重を採用した。

アルミ合金、純銅、SS400のいずれの工作物に対しても、SKD61の荷重が最も高く、FSX01が最も低い値となった。また、SS400での3材種ツールの走行時ビードを図6に、FSX01ツールのアルミ合金、純銅での走行時ビードを図7に示す。

表4 異種材料でのツール材種評価条件

項目	内容(条件)
ツール材種	FSX01(開発材種名)
	FS03(開発材種名)
	SKD61
工作物材種	アルミ合金(A5083)
	純銅
	SS400
試験方法	単独工作物上でのツール押し込み走行
押し込み深さ	0.25mm
ツール回転数	2,000rpm (アルミ合金、純銅)
	1,500rpm (SS400)
走行速度	100mm/min.
走行距離	100mm×4ビード
測定項目	走行時荷重(X、Y、Z軸) キスラー製荷重計

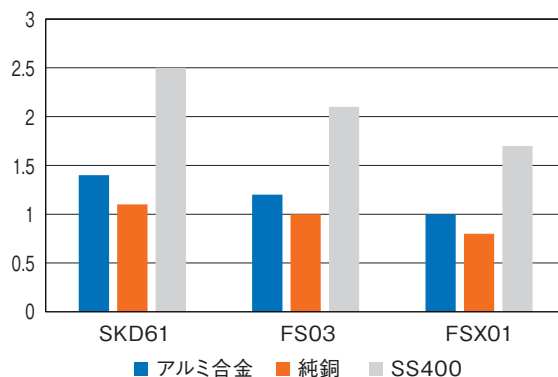


図5 ツール材種と最大荷重評価

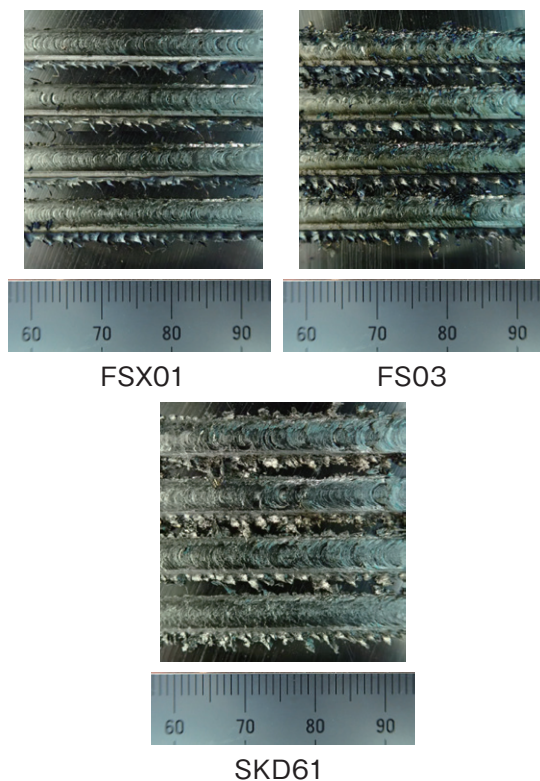


図6 SS400でのツール走行評価ビード外観 (ツール走行: 右→左、下から1ビード～4ビード)

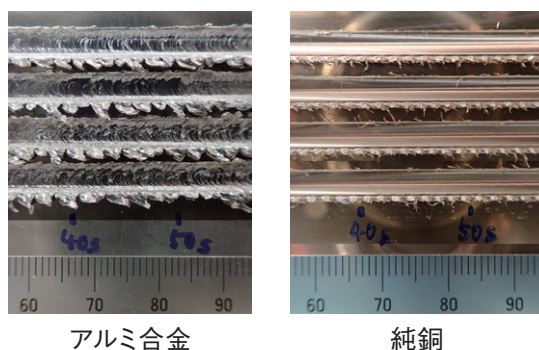


図7 FSX01ツールでのアルミ合金、銅のビード外観 (ツール走行: 左→右、下から1ビード～4ビード)

6. アルミ合金と異種材料接合

アルミ合金と異種材料を接合する場合、FSX01はSKD61と比較し、安定した低い荷重で接合できる可能性が高いと考えられる。

そこでFSX01ツールを使用して、アルミ合金(A5083)と純銅、純チタン、SS400の重ねあわせ接合を想定した評価を実施し、接合前後のツール外観状態とその接合面を観察した。

接合条件を表5に、またその接合面観察を図8に示す。接合界面では異種材料との混合状態が確認できた。

表5 異種材料接合評価条件

項目	内容(条件)
ツール材種	FSX01(開発鋼種名)
工作物材種	純銅
	純チタン
	SS400
試験方法	重ねあわせFSW
押込み深さ	0.4mm
ツール回転数	2,000rpm
走行速度	100mm/min.
走行距離	100mm



純銅(下側)



純チタン(下側)



SS400(下側)

図8 異種材料接合の界面観察例

7. まとめ

今回、FSWの課題となるアルミ凝着や異種材料接合の観点から新たにツール材種開発および評価試験を行ない、以下の結果が得られた。

- ①アルミ凝着抑制の効果を確認するためスポット接合評価を実施した。SKD61はアルミ合金の凝着が観察されたが、FS03は観察されなかった。これはツール構成材料成分による表面性状の影響と考えられる。
- ②異種材料接合を想定し、アルミ合金、純銅、SS400工作物単体へのツール押込み・走行評価を実施した。高温特性に優れたFSX01の走行荷重が最も低く、次いでFS03、SKD61となった。高温強度や熱伝導率などによる入熱の差異が発生しているものと考えられ、FSX01は高温領域でも優れた接合特性を発揮することが期待される。
- ③FSX01ツールによるアルミ合金と異種材料との接合実証試験を実施した。アルミ合金を上、純銅、純チタン、SS400それぞれ重ねあわせFSWを実施した。純銅および純チタンにおいて、接合界面でのアルミ合金と異種材料の混合状態が観察された。今回の評価条件において、SS400では良好な接合界面が得られなかったが、いずれの条件においても、ツール早期損耗、工作物凝着は観察されず、接合条件を最適化することにより、アルミ合金と異種材料において、良好な接合が得られることが期待できるものと考えられる。

8. 今後の展開

FSWは、接合することを基本にして、さらなる応用と発展が期待されている。

- ①接合解析では接合時の荷重や温度測定、接合品の機械的特性試験やSEM・EPMAにより物理的かつ化学的な評価が重要となる。流動解析により、何が起きているのかを可視化することにより事象の解明をすすめていく。
- ②FSWツールはその材質のみならず形状、表面性状などが複合して機能を発揮する。NACHIの材料技術、熱処理・表面処理技術、機械加工技術を駆使し、新たな市場に向けたツールを自社完結で製作、さらにロボットを活用した自由度の高いFSW接合システムへ繋げていく。
- ③FSWによる複合部材、組織制御、金属間化合物生成などの事象を発展させ、EV車体部材のみならず、二次電池、センサー、触媒などに向けた特殊機能を有した材料開発の新たな手法としての可能性を追求していく。

今後もFSWを活用して次世代市場の開拓をすすめていき、新たな成果や知見が得られれば、改めて報告したいと考える。