

《様式B》

研究テーマ 「めっきを利用した鉄-アルミニウムのスポット溶接技術の開発」

研究責任者 所属機関名 浜松工業技術支援センター

官職又は役職 上席研究員

氏 名 田光 伸也 メールアドレス shinya1_tako@pref.shizuoka.lg.jp

共同研究者 所属機関名 やまと興業株式会社

官職又は役職 品質保証課 課長

氏 名 境澤 知彦

(令和3年度募集) 第34回 助成研究 完了報告書

2. 研究の実施内容および成果に関する報告

(1) 研究テーマ

めっきを利用した鉄-アルミニウムのスポット溶接技術の開発

(2) 実施内容および成果ならびに今後予想される効果の概要 (1, 000字程度)

※産業技術として実用化の可能性や特許出願 (予定も含む) の有無についてもご記載ください。

鉄-アルミニウム (アルミ) の接合技術には、次世代自動車等の軽量化対策として高いニーズがあり、静岡県内の自動車部品製造業者でもスポット溶接を用いた部品が検討されている。しかし、鉄とアルミのスポット溶接ではアルミが過剰に溶融し、接合面に脆弱な金属間化合物が形成されやすく、十分な接合強度を得ることは難しい。

そこで我々は、接合面積 (表面積) に着目した。鉄表面を無数の凸形状の金属で覆い、凸形状の隙間を溶融したアルミで満たすことで接合に関わる表面積が増え、十分なせん断強さを示す鉄とアルミ接合が期待できる。

本研究では、表面が凸形状のめっき (ラフネスニッケルめっき) を利用した、汎用スポット溶接機による鉄とアルミの接合技術の開発を試みた。その結果、以下のような成果を得ることができた。

- ・汎用の単相交流方式のスポット溶接機において、鋼板 (SPCC, 厚さ 0.8 mm) とアルミ板 (A1050, 厚さ 0.5 mm) のスポット溶接条件を改善した。
- ・先端の鋭いラフネスめっき (めっき条件: 電流密度 1 A/dm²、通電量 900 C) を施した場合、改善条件によるスポット溶接 (スポット径 3 mm、溶接電流 5.5 kA) を行いせん断強さ 430 Nを達成し、JIS B 級におけるアルミの引張せん断強さを上回った。* JIS

Z3140:2017 B 級におけるアルミの引張せん断強さ 390 N（アルミ同士を接合する場合）

- ・このとき接合部に金属間化合物は認められず、これまでにない特性を得られる可能性が示唆された。

本研究により、汎用のスポット溶接機を用いて鋼板とアルミを接合する際、ラフネスニッケルめっきを用いることで接合強度及び品質の向上が期待出来ることを確認した。この技術を応用すれば、これまで輸送機器部品を製造してきた中小企業が新たな設備投資なしで、次世代自動車等の軽量化部品を開発する事も可能である。共同研究者のやまと興業(株)では、鉄パイプにアルミ製のケーブルラップをスポット溶接で接合する部品など、本研究で得られた知見を新規の軽量化部品開発に活用する予定である。

また、異種材料のスポット溶接にめっきを利用することで接合性を向上させることができたため、鉄とアルミ以外の様々な接合においてもめっきが利用される可能性が開けた。実用化のためには、部分的にラフネスめっきを施す技術や後処理方法の開発が必要でありいくつかの解決すべき課題が残っている。研究成果についての特許出願は実施せず、得られためっき方法などの情報は研究発表や広報活動により開示する方針のため、めっき事業者にとって新規事業への参入機会が増加し、業界の活性化が期待出来る。

(3) 実施内容および成果の説明（A 4 で、5 ページ以内）

(1) 目的

鉄-アルミニウム（アルミ）の接合技術には、次世代自動車等の軽量化対策として高いニーズがある¹⁾。NEDO によるプロジェクトなど多くの研究成果が報告されており^{2)~4)}、静岡県内の自動車部品製造業者でもスポット溶接を用いた部品が検討されている。しかし、鉄とアルミのスポット溶接ではアルミが過剰に溶融し、接合面に脆弱な金属間化合物が形成されやすく⁵⁾、十分な接合強度を得ることは難しい。

そこで我々は、接合面積（表面積）に着目した。鉄表面を無数の凸形状の金属で覆い、凸形状の隙間を溶融したアルミで満たすことで接合に関わる表面積が増え、十分なせん断強さを示す鉄とアルミ接合が期待できる。

本研究では、表面が凸形状のめっき（ラフネスニッケルめっき^{6), 7)}）を利用し、汎用スポット溶接機による鉄とアルミの接合技術の開発を試みた。

(2) 方法

鋼板（SPCC、厚さ 0.8 mm）にラフネスニッケルめっきを施し、アルミ板（A1050、厚さ 0.5 mm）を汎用の交流スポット溶接機 YR-500SB2（パナソニック㈱）を用いて接合し、引張せん断試験片を作製した（図 1）。

ラフネスニッケルめっきは、めっき時の電流密度を変えて表面形態を変化させた。ラフネスニッケルめっきのめっき治具を図 2 に、処理条件を表 1 に示す。

低融点めっきは、ニッケルリン合金めっき ニムデン DX（上村工業㈱、融点 910 °C）を用い、ラフネスニッケルめっきの凸形状が消失しないよう、0.5 μm 以下の膜厚となるよう施した。めっき厚さは金属顕微鏡 MA200（㈱ニコン）を用いて断面からの実測、及びエネルギー分散型蛍光 X 線分析装置 SEA5120A（㈱日立ハイテク）により測定した。

スポット溶接条件は、ワイヤハーネス固定用の薄板の接合を想定し、電極形状を φ3.0 mm、電極を押える圧力を 0.06 MPa、印加時間を 0.05 秒とした。溶接電流は検討項目により 3.0~7.0 kA の間で変化させた。

接合強度は、引張試験機 AG-250kNXplus（㈱島津製作所）によりせん断力を測定した。

表面及び断面観察/元素分析には、電界放射型走査電子顕微鏡 JSM-7610FPlus（日本電子㈱）を用いた。断面試料はイオンミリング装置 IB-09010CP（日本電子㈱）により作製した。

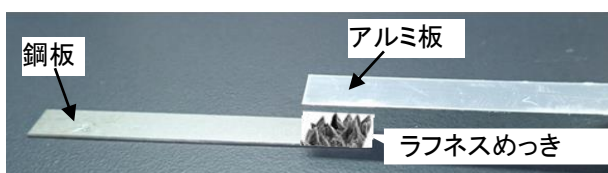


図1 引張せん断試験片のイメージ

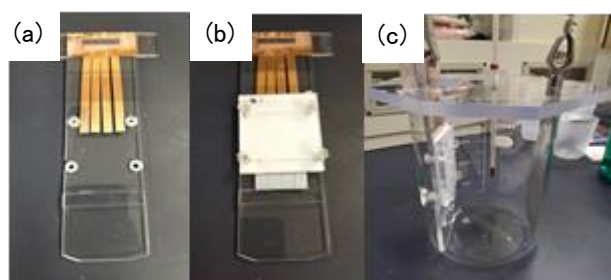


図2 めっき治具

- (a) カソード台座（鋼板4枚を同時処理可能）
- (b) カソード台座に鋼板4枚をセット（シリコーン樹脂によりマスキング）
- (c) 電極間距離を一定に保つ電解槽

表 1 ラフネスニッケルめっき処理条件

項目	設定値
めっき浴種類	塩化浴（塩化ニッケル 130 g/dm ³ 、ホウ酸 61 g/dm ³ ）
pH	pH 3.0（調製用試薬：HCl、NiCO ₃ ・6H ₂ O 水溶液）
浴温	40 °C（スターラー攪拌）
電流密度	1、5、10 A/dm ²
通電量	0（めっきなし）、60、300、900、1200 C/dm ²

(3) 結果と考察

ア. 溶接条件の検討

めっきを施していない鋼板とアルミ板を、溶接電流を 3.0 から 6.0 kA まで変化させてスポット溶接し、せん断強さの測定及び電極接触部の表面状態を観察した。せん断強さと溶接電流の関係を図 3 に、溶接電流 6.0 kA における電極接触部のアルミ板表面観察結果を図 4 に示す。

溶接電流が高いほどせん断強さは向上したが（図 3）、溶接電流 6.0 kA でアルミ板と電極との間に凝着が発生し、電極接触部の表面に多数の割れが観察された（図 4）。このため、電極接触部の表面に異常の認められなかった 5.5 kA を溶接電流とした。

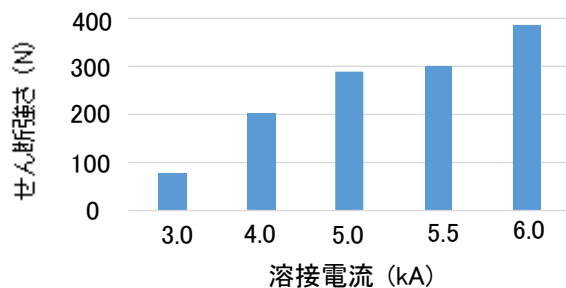


図3 せん断強さと溶接電流の関係



図4 電極接触部のアルミ板表面
(溶接電流 6.0 kA)

イ. ラフネスニッケルめっきの効果

鋼板に、通電量 1200 C/dm^2 、電流密度 1.0、5.0、 10.0 A/dm^2 でラフネスニッケルめっきを施し、溶接電流 5.5 kA でアルミ板をスポット溶接した。ラフネスニッケルめっきの表面形態と電流密度の関係を図 5 に、せん断強さに対するめっき電流密度の影響を図 6 に示す。

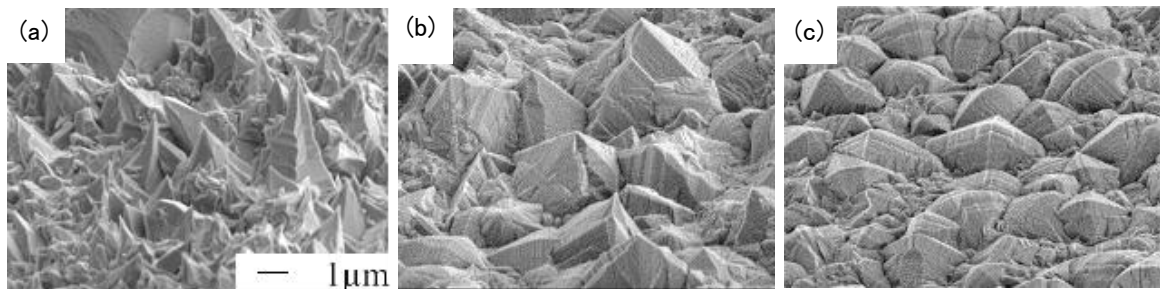


図5 ラフネスニッケルめっきの表面形態と電流密度

(a) 電流密度 1.0 A/dm^2 、(b) 電流密度 5.0 A/dm^2 、(c) 電流密度 10.0 A/dm^2

ラフネスニッケルめっきの表面形態はいずれの電流密度でも凸形状となり、電流密度は少ないほど凸形状は鋭角化した（図 5）。凸形状が最も鋭い 1.0 A/dm^2 でラフネスニッケルめっきを施した試料のせん断強さは 390 N となり、めっきなしに比べ 70 N 向上した（図 6）。

図 7 にスポット溶接の接合部界面を示す。図中の A～D の金属組織は元素分析により金属間化合物と確認した。溶接電流 5.5 kA でスポット溶接した場合、めっきなしの試料では接合界面に金属間化合物が存在したが（図 7 a）、ラフネスニッケルめっきを施した試料では金属間化合物は認められなかった（図 7 b）。

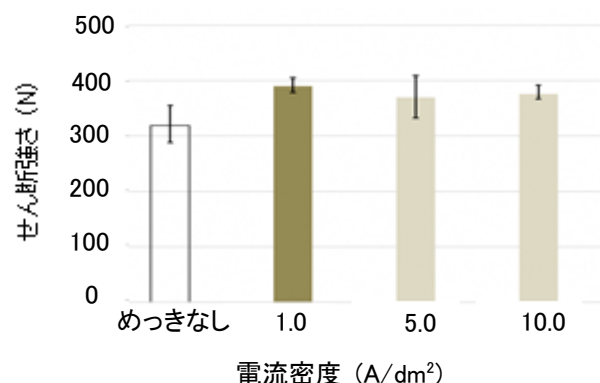


図6 せん断強さに対するラフネスニッケルめっき電流密度の影響

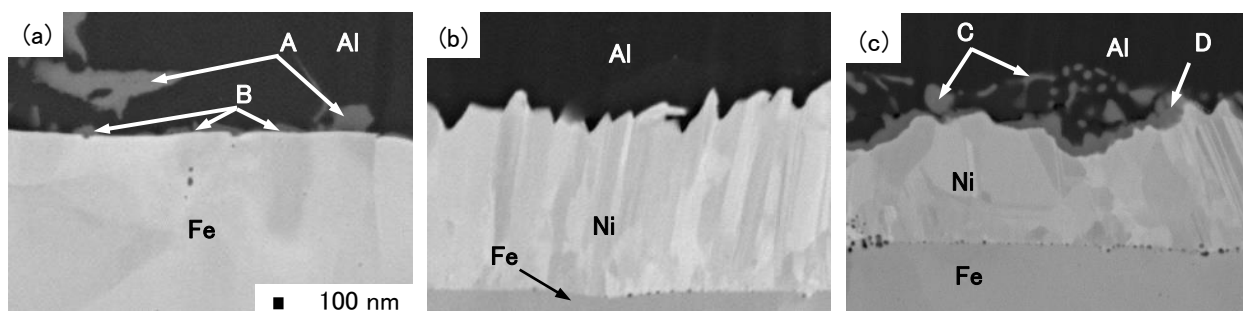


図7 スポット溶接の接合部界面

- (a) めっきなし、溶接電流 5.5 kA
 (b) ラフネスニッケルめっき (1.0 A/dm²)、溶接電流 5.5 kA
 (c) ラフネスニッケルめっき (1.0 A/dm²)、溶接電流 7.0 kA

しかし、溶接電流 7.0 kA ではめっきのラフネス構造は崩れ、接合界面に金属間化合物が認められた(図 7c)。これは、過剰な溶接電流でラフネスニッケルめっきが溶融したためと考えられる。

ウ. 低融点めっきの効果

ラフネスニッケルめっき上に図 8 に示すように低融点のめっきを施して多層化し、鋼板とアルミ板の間に融点の温度勾配を設けることで、従来とは異なるメカニズムで溶接できるのではないかと考えた。

めっき後の鋼板を溶接電流 5.5 kA でアルミ板とスポット溶接し、せん断強さを測定した結果を図 9 に示す。この結果、低融点めっきによるせん断強さの向上効果は認められなかった。溶接電流を大きくすればせん断強さが向上する可能性はあるが、工程の増加、金属間化合物の生成リスク増加などのデメリットを上回る効果を得ることは難しいと考えられる。

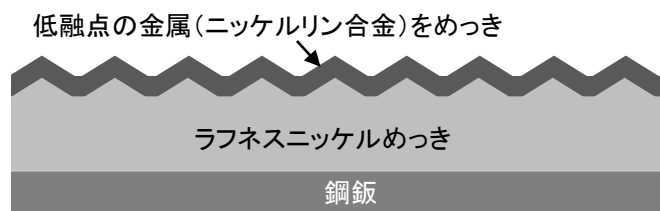


図8 めっきの断面イメージ

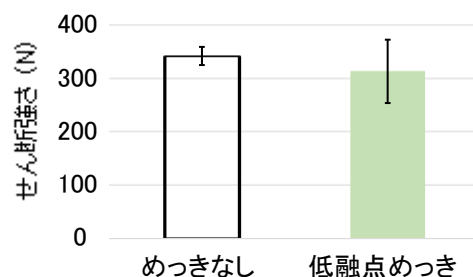


図9 低融点めっきを利用した場合のせん断強さ

エ. ラフネスニッケルめっきの薄膜化

めっきは薄いほど生産コストや管理コストを削減できるため、工業化する際に有利である。本項では、電流密度を 1.0 A/dm² とし、通電量を 60、300、900、1200 C/dm² と変化させ、ラフネスニッケルめっきを 0.2~3.1 μm に薄膜化した。その他のめっき条件は表 1 に従った。前項までと同様に、めっき後の鋼板を溶接電流 5.5 kA でアルミ板とスポット溶接し、せん断強さを測定した(図 10)。通電量 60、300 C/dm² では接合強度の向上は認められなかったが、900 C/dm² では最も高いせん断強さ 430 N を示した。

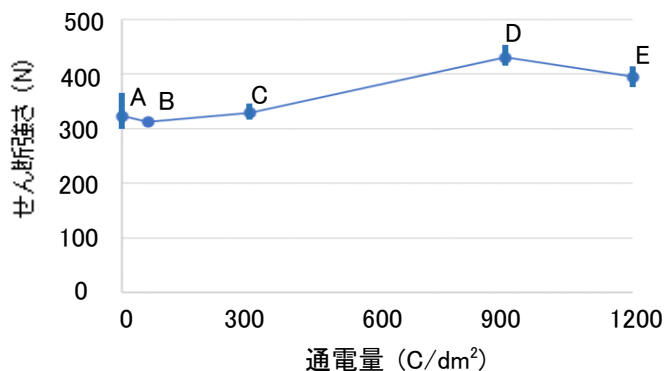


図 10 ラフネスめっき通電量とせん断強さ

- 通電量と膜厚 A: 0 C/dm²、めっきなし
 B: 60 C/dm²、0.2 μm
 C: 300 C/dm²、0.5 μm
 D: 900 C/dm²、2.1 μm
 E: 1200 C/dm²、3.1 μm

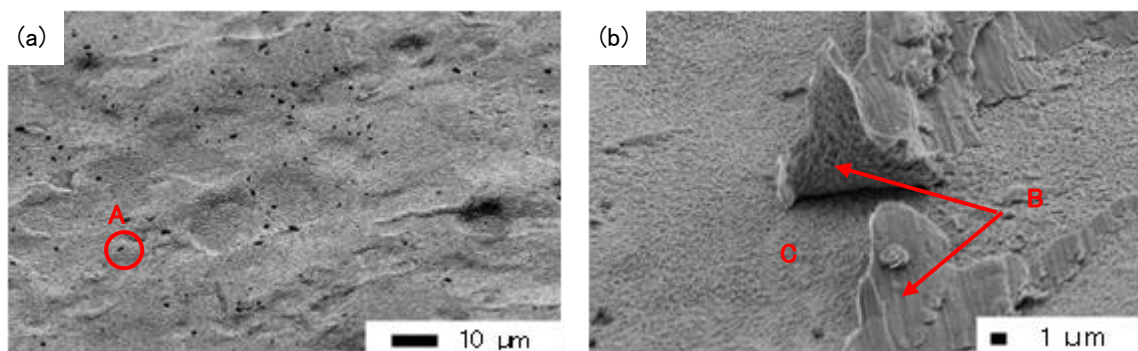


図 11 破断面の外観(通電量 300 C/dm²)
(a) めっき側破断面(低倍率)、(b) 破断面のアルミ残部(高倍率)

通電量 300 C/dm² 以下でせん断強さが向上しなかった要因を検討するために通電量 300 C/dm² の試料における引張試験後の破断面（接合部の界面）を電子顕微鏡で観察した。結果を図 11 に示す。図 11a の A に示す部分に観察される黒点はアルミ破断片であり、ラフネスニッケルめっき表面には 1 μm 程度のアルミ破断片が残っていた。また、破断面の一部に図 11b の B で示すような 10 μm 以上の破断片が認められた。B には、ラフネスニッケルめっき（図 11b の C で示す部分）の表面形態が転写されたように見える部分が存在しており、ラフネスニッケルめっきにアルミ板が十分に溶け込んでおらず、界面が剥離するように破断したことが示唆された。

以上より、通電量 60 C/dm²、300 C/dm² でせん断強さが向上しなかったのは、ラフネスニッケルめっき表面に形成されたニッケル酸化物層を破壊するのに十分な発熱量が得られず、ラフネスニッケルめっきとアルミ板間に金属結合が形成されなかったためと考えられる。

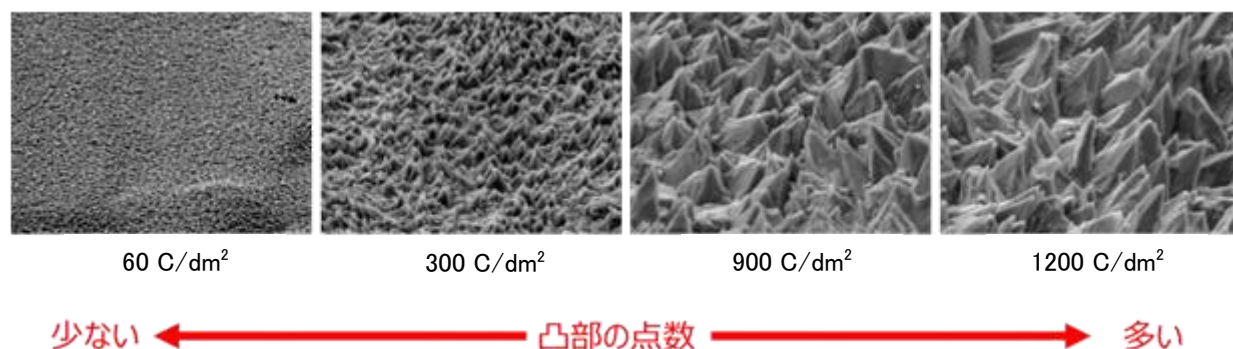


図 12 ラフネスニッケルめっきの表面形態と通電量

ラフネスニッケルめっきの表面形態と通電量の関係を図 12 に示す。ラフネスニッケルめっきは通電量が増加すると凸部が成長し、凸部の点数は減少した。通電量の少ない試料では、凸部が過剰に存在したため溶接電流が分散し、十分に発熱しなかったと推測できる。

通電量 900 C/dm² における接合部界面の断面を電子顕微鏡で観察した結果を図 13 に示す。通電量 900 C/dm² では 1200 C/dm² と同様に、ラフネスニッケルめっきとアルミの間に金属間化合物は認められなかった。鉄とアルミのスポット溶接では金属間化合物が生成することが一般的であり⁸⁾、ラフネスニッケルめっきを用いることで、これまでにない特性を得られる可能性が示唆された。

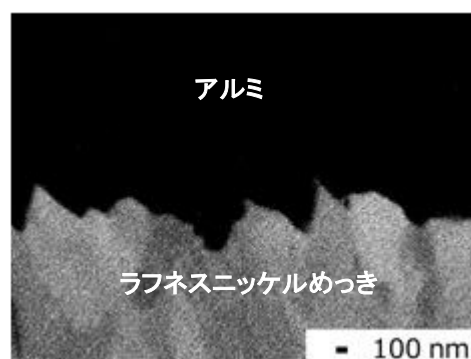


図 13 接合部界面の断面
(通電量 900 C/dm²)

オ. 試作

量産用と同材の鉄製パイプをマスキングし、ラフネスニッケルめっき（電流密度 1.0 A/dm^2 、通電量 900 C/dm^2 ）を施した。めっき処理部分にアルミ板（A1050、厚さ 0.5 mm ）をスポット溶接（スポット径 3.0 mm 、溶接電流 5.5 kA ）し、図 14b, c に示すケーブルラップ試作品を作製した。

ラフネスニッケルめっきを施さない場合、ケーブルを固定するためにケーブルラップを数回折り曲げるとスポット溶接部は破損したが（図 14b の A で示した部分）、ラフネスニッケルめっきを施しスポット溶接した場合は図 14b の B に示すように破損は起こらず、ケーブルを束ねることができた（図 14c）。

鉄製ステーに取付ける従来の樹脂製ケーブルラップ（図 14a）に比べ、試作品は必要箇所にスポット溶接で取付けるため、部品点数の削減（軽量、低コスト）、設計の自由度向上などの効果が期待できる。



図 14 ケーブルラップと試作品

- (a) 鉄製ステーに取付けた樹脂製ケーブルラップ
- (b) ステーを必要としない試作ケーブルラップ
- (c) ケーブルを取り付けた試作ケーブルラップ

(4) まとめ

汎用のスポット溶接機を用いた鋼板とアルミ板のスポット溶接において、せん断強さに対するラフネスニッケルめっきの寄与を確認し、次に示す知見を得た。

- ・汎用の単相交流方式のスポット溶接機において、鉄板（SPCC、厚さ 0.8 mm ）とアルミ板（A1050、厚さ 0.5 mm ）のスポット溶接条件を改善した。
- ・改善条件によりスポット溶接（スポット径 3.0 mm 、溶接電流 5.5 kA ）を行い、先端の鋭いラフネスめっき条件（電流密度 1.0 A/dm^2 、通電量 900 C/dm^2 ）で、せん断強さ 430 N を達成し、JIS B 級を上回った。 *JIS Z3140 B 級=390 N: アルミ同士の接合時
- ・接合部に金属間化合物は認められず、ラフネスニッケルめっきを利用せずにスポット溶接した場合に比べ特徴的であり、これまでにない特性を得られる可能性が示唆された。

文献

- 1) 樽井 大志 ; ふらすとす, 64, 187-191 (2023) .
- 2) 杉本 幸弘, 田中 耕二郎, 西口 勝也 ; 軽金属, 69, 74-80 (2019) .
- 3) 桃野 正, 圓城 敏男 ; 軽金属, 35, 396-404 (1985) .
- 4) 田中 耕二郎, 深堀 貢, 西口 勝也 ; 溶接学会誌, 90, 497-500 (2021) .
- 5) 櫻井 健夫 ; 軽金属, 71, 466-469 (2021) .
- 6) 田光 伸也 他 ; 表面技術, 71, 696-702 (2020) .
- 7) Shinya Tako, et al.; Transactions of the IMF, 99, 80-86 (2021).
- 8) 岩瀬 哲, 奥田 真三樹 ; 軽金属, 72, 395-402 (2022) .