論文

3層アルミニウムクラッド材の材料流れと凝着部の可視化*

鳥飼 岳**, 吉田 佳典***, 浅野 峰生****, 新倉 昭男*****

Visualization of Metal Flow and Adhering of Aluminum Alloy in Three-Layer Clad Rolling*

Gaku Torikai**, Yoshinori Yoshida***, Mineo Asano**** and Akio Niikura*****

In cold and hot pressure welding, the mechanism based on oxide film breakage by surface expansion and diffusion through newly formed surface is suggested. It is explained that the mechanisms of the dissimilar metals joining in pressure welding and clad rolling are same, although the deformation in pressure welding and clad rolling is different. In this paper, the mechanism of the dissimilar metals joining in clad rolling was investigated with visualization of metal flow and adhering of aluminum alloy in three-layer clad rolling.

The clad metal consisting of the upper liner material of 4000 series aluminum alloy, the core material of 3000 series aluminum alloy and the lower liner material of 7000 series aluminum alloy was hot-rolled at 813K. The upper-and-lower surfaces of the core and liner materials were trimmed after casting in order to remove the inhomogeneous layers. The cutter marks of the core material remained in the upper-and-lower surfaces of the liner materials were flat, because they were hot-rolled. Firstly, the metal flow in clad rolling was visualized. It was clear that the interface condition between core and liner materials were observed. It was recognized that the newly formed surfaces after the breaking of the oxide films were contacted like pressure welding. Finally, the fracture surfaces of core and liner materials were deformed and many dimples were formed in the newly formed surfaces. The manganese elements which only existed in core material were detected in many dimples of the upper liner material.

From the above results, it was suggested that the liner materials were joined to the core material, because the oxide films of the real contact surfaces were broken in the roll gap with high pressure at first pass in rolling. After second pass in rolling, the adhesion parts were increasing by setting rolling reduction as the strength of the adhesion parts formed at before pass in rolling was not exceeded.

Keywords: rolling, aluminum, clad metal, solid phase bonding, tribology

1. はじめに

複数の異種金属を積層したクラッド材は,耐食性, 高強度および熱伝導性など,様々な機能を付加できる 機能性材料である。薄板コイルを量産するには,生産 性の観点から圧延法による製造が適している。圧延法 によるクラッド材の接合メカニズムを解明できれば, 圧延時の板剥がれなどの生産技術的な問題を解消し, さらなる生産性の向上が期待できる。本研究では,熱 間圧延法によるアルミニウムクラッド材の接合メカニ

The main part of this paper has been published in Procedia Manufacturing, 15 (2018), 144-151.

^{*} 本稿の主要部分は, Procedia Manufacturing, **15** (2018), 144-151 に掲載。

^{** (}株)UACJ 自動車部品事業本部 製造統括部

Manufacturing and Production Engineering Department, Automotive Parts Business Division, UACJ Corporation *** 東海国立大学機構 岐阜大学 工学部

Department of Mechanical Engineering, Gifu University, Tokai National Higher Education and Research System **** (株) UACJ 福井製造所 製品技術部

Product Design & Technology Department, Fukui Works, UACJ Corporation ***** (株) UACJ 自動車部品事業本部 モビリティテクノロジーセンター Mobility Technology Center, Automotive Parts Business Division, UACJ Corporation

ズムを解明することを目的とする。

圧延法によるクラッド材の接合メカニズムは昔から 研究されている。Vaidyanathらは、様々な金属の皮付 け圧延実験結果から接合強度と材料強度の比と圧下率 の関係を示した¹⁾。角川らは、銅と鋼のクラッド圧延 実験結果から芯材と皮材のすべり量が接合強度に影響 することを示した²⁾。Wrightらは、Vaidyanathのモデ ルを基に、加工変質層を考慮することで接合強度と材 料強度の比を定式化した³⁾。Wrightらの皮付け圧延の 模式図は、修正されて度々用いられている⁴⁾。Bayらは、 軟質材と硬質材の異種金属同士が両方ともに降伏する ことで接合するとし、表面拡大率による冷間圧接の接 合メカニズム⁵⁾を基に、冷間圧延法によるクラッド材 の接合モデルを提案した⁶⁾。

熱間圧延法によるクラッド材接合では、古くは田中 らの研究にあるように、圧下率が小さいと接合しない 結果であった⁷⁾。最近では、G. Szabóの報告書の表2に あるように、低圧下率でも接合することが知られてい る⁸⁾。Weiは実験と解析から、温間圧延によるクラッド 材の接合メカニズムは、酸化皮膜の破壊、新生面の押 付けおよび接合界面における拡散であるとしている⁹⁾。 熱間圧延でも接合メカニズムは類似していると考えら れる。Kingらは、熱間圧接では、高温クリープ変形と 拡散による酸化皮膜の分散により金属界面が消失する モデルを提案している¹⁰⁾。ただし熱間圧延によるクラ ッド材接合の加工時間は非常に短く、Kingらの拡散に よる接合メカニズムを適用しにくい。

クラッド材の圧延解析も実施されている。Qinらは ステンレスの熱間クラッド圧延の多パス解析を実施し ており,硬質材の変形抵抗以上の圧力が界面に掛かる ことで異材が接合すると定義している¹¹¹。皮付け圧延 中の材料の変形挙動は,接合メカニズムを解明するの に重要である。しかしながら,以上の研究では模式図 や解析を基に皮付け圧延中の材料流れを決めている。 皮付け圧延中の材料内部の変形状態を可視化した研究 は,これまでほとんど報告されていない。

そこで本研究では、4000系、3000系および7000系の 3層クラッド材について、熱間圧延時の芯材と皮材の変 形挙動を可視化した。その結果から、巨視的な皮付け 圧延時の圧延前後における接触界面の表面積変化率を 求めた。さらに、クラッド材の剥離面を詳細に観察し、 皮材と芯材表面の微視的な変形挙動を明らかにした。 加えて剥離面の芯材添加元素EPMA分析によりメタル フローを可視化した。これらの結果を基に、材料流れ を考慮した熱間圧延法によるアルミニウムクラッド材 の接合メカニズムを提案した。

2. 実験方法

2.1 供試材

芯材はAl-Mn系合金であり、鋳造して均質化処理した後、皮材と接触する両面を面削した。芯材上面に用いる上皮材はAl-Si系、芯材下面に用いる下皮材は Al-Zn-Mg系であり、両皮材とも鋳造した後、圧延面を 面削し、723 Kで加熱した後に熱間圧延した。芯材表 面に面削痕を残し、皮材表面は熱延で平滑化すること で圧延による表面凹凸の変形について調査しやすくし た。Table 1 に材質の組成を示す。

芯材は厚さ155 mm×幅175 mm×長さ1300 mm,上 皮材および下皮材は厚さ20 mm×幅165 mm×長さ 1260 mmに切断し、上皮材、芯材および下皮材を重ね 合わせて全厚195 mmとして、四隅を20 mm長さで MIG溶接した。ここで、圧延中のスラブ内部の材料流 れを可視化するため、芯材と皮材を溶接したスラブに 放電加工でφ1 mmの貫通穴を開けた。Fig.1に圧延前 スラブの外観写真を示す。

2.2 流動応力と酸化皮膜厚さ

これら供試材の流動応力は, Fig. 2に示すように上 皮材と芯材がほぼ等しく,下皮材が最も高かった。こ こで,材料温度は813 K,ひずみ速度は4.5 s⁻¹である。 また,SPECTRUMA製GDA750 (グロー放電発光分光 分析 (GD-OES))を用いて各サンプルの酸素濃度分布を 深さ方向に測定した結果,Fig. 3に示すように上皮材 と芯材の酸化皮膜厚さがほぼ等しく,下皮材の酸化皮 膜厚さが最も厚かった。ここで,酸化皮膜厚さは酸素 濃度の半値幅とした。

2.3 熱間圧延条件

芯材と皮材を溶接したスラブを813 Kに加熱した後

Part	Alloy	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn
Upper liner material	Al-Si based alloy	7.7	0.1	_	-	-	-
Core material	Al-Mn based alloy	0.6	0.1	0.7	1.2	-	-
Lower liner material	Al-Zn-Mg based alloy	-	-	_	-	2.2	1.5

 Table 1
 Chemical compositions of sample materials (mass %).

に圧延した。ここで,ロール温度は343 K,ロール直 径は325 mm,圧延速度は5 m/minである。Table 2に パススケジュールを示す。ここで,1および2パス目は 一方向圧延とし,材料温度が下がらないよう3パス以 降はリバース圧延とした。また,熱延前加熱後のスラ ブ中央をロールで挟み,荷重が検出された位置をリダ クション設定のゼロ点とした。

実験結果と考察

3.1 パススケジュールが接合性に及ぼす影響

横型帯鋸で幅20 mmに切断した結果,皮材が剥がれたものを『未接合』,皮材が剥がれなかったものを『接合』 と定義した。Table 3に示すように,上皮材は1パスで 接合しているのに対し,下皮材は3パス目まで未接合であった。また,5パス目では下皮材の一部が剥がれ た。下皮材にはMgが高い濃度で添加されているため, スラブ表層の酸化皮膜が厚くなり,かつ熱間変形抵抗 が高く塑性変形しにくいため,酸化皮膜が破れにくく なり,下皮材と芯材が接合しにくかったと考えられる。

3.2 材料流れの可視化

Fig. 4にスラブ幅中央断面における材料流れを示 す。上皮材は圧延入側に向けてずれており、芯材と上 皮材のずれ量は圧延入側に向かって大きくなった。ま た、1、2および8パス目の芯材と上皮材のずれ量はほ ぼ同じであり、8パス目では上皮材と芯材の界面におい て上皮材がせん断変形していた。一方、下皮材は、未 接合であった1および2パス目では圧延入側に向けてず れており、接合した8パス目では圧延入側と圧延出側 の両方向にずれていた。上皮材は一方向圧延で接合し、 下皮材はリバース圧延で接合したので、このような変



Fig. 1 Laminated slab for hot-rolling, (a) photograph of laminated slab; (b) coordinate of holes for metal flow visualization.



Fig. 2 Flow curves of sample materials.



Fig. 3 Oxide film thicknesses on sample materials.

ıle

Pass number	Reduction ratio / %	Rolling direction
1	0.1	One-way
2	0.1	One-way
3	0.2	Reverse
4	0.2	Reverse
5	0.4	Reverse
6	0.4	Reverse
7	0.5	Reverse
8	0.5	Reverse

 Table 3 Influence of rolling pass schedule on bonding between core and liner materials.

Pass number	1	2	3	4	5	6	7	8
Total reduction ratio / %	0.1	0.2	0.4	0.5	0.9	1.2	1.7	2.3
Upper liner material	bonded	bonded	bonded	bonded	bonded	bonded	bonded	bonded
Lower liner material	separated	separated	separated	bonded	(bonded)	bonded	bonded	bonded

(bonded) : separated partially

形状態になったと考えられる。以上の結果から,芯材 と皮材の界面は,界面がずれやすい状態から界面がず れにくい状態へ遷移した。界面状態が遷移する原因は, 芯材と皮材の凝着部の広さに関係すると推定される。

Fig. 4から圧延後の表面積拡大率を求めた結果, Fig. 5 に示すように,上皮材,下皮材ともに接合に要した表 面積拡大率は数%程度であった。また,芯材の表面積 拡大率はほぼゼロであった。ここで,表面積拡大率と は圧延前後におけるスラブ表面積の変化率を表し,ス ラブ中央は平面ひずみなので格子線の線長変化が表面 積拡大率となる。KEYENCE製3D形状測定器VR-3000 を用いて格子線の線長を測定した。その結果,上皮材 と下皮材の表面積拡大率は数%であるが,芯材は0.3% 以下と表面積が変化していないことから,異種金属同 士が変形する必要のあるBayらの冷間圧接の接合メカ ニズムは巨視的には適用できないと考えられた。

3.3 破面観察

3.3.1 芯材と上皮材の表面性状

圧延後サンプルから短冊状に切り出したサンプルを 曲げ加工することで剥離させ、その剥離面を観察した。 上皮材では、Fig. 6に示すように、面削により形成さ れた芯材の凹凸形状が上皮材に転写されていた。また、 上皮材と芯材の剥離面をHITACHI製SU8230でSEM 観察したところ、Fig. 7に示すように上皮材の凹部と 芯材の凸部にディンプルパターンが形成されていた。 このことから、芯材の面削痕の凸部が上皮材に接触し、 ロールによって上皮材に押し込まれることで酸化皮膜 が分断され固相接合されたと考えられる。ここで、よ り詳細に圧延前後における表面凹凸の変化を把握する



Fig. 4 Metal flow inside laminated slab after first, second and 8th pass, (a) first pass; (b) second pass; (c) 8th pass.



Fig. 5 Surface expansion ratio after hot-rolling.









ため, KEYENCE製3D形状測定器VR-3000を用いて 剥離面の3次元測定を実施した。3次元測定の結果, Fig. 8に示すように芯材の凹凸深さは小さくなり,上 皮材には芯材の凹凸が転写されていた。以上の結果か ら,芯材と上皮材の表面は微視的には塑性変形してお り,異種金属同士が変形していることから微視的には Bayらの冷間圧接の接合メカニズムが適用できると考 えられる。

ここで、芯材に添加され、かつ上皮材には添加され ていないMnを島津製作所製EPMA-1610でEPMA分 析し、上皮材の移着部の可視化を試みた。移着部とは、 凝着部の破断によって微小な表面凹凸同士が接触して いる真実接触部の一部が分離して相手面に残存した部 分を指している。ディンプルの大きさが数µm程度で あったので、ビーム径を1µmとした。また、サンプル 同士を比較できるように、電圧、電流、積算時間およ び蒸着膜厚の条件を一致させた。移着部を可視化した 結果、Fig.9に示すようにディンプルが観察された上 皮材の凹部にてMn濃度が高かった。また、パス数が 増加することでMn濃度の高い領域が広がり、接合部 である凝着部が増えていた。ここで、カラーバーはサ ンプルに電子線を当てた際に発生する特性X線のカウ



(a) Upper liner material

(b) Core material

Fig. 8 Surface profiles on core material and upper liner material before and after rolling, (a) upper liner material; (b) core material.



Fig. 9 EPMA elemental maps showing concentration of Mn remained on bonding surfaces of upper liner material, (a) after second pass; (b) after 8th pass.

ント数である。

3.3.2 芯材と下皮材の表面性状

一方,下皮材では,Fig.10に示すように面削により 形成された芯材の凹凸形状が潰れ,下皮材への凹凸形 状の転写も不明瞭であった。また,下皮材と芯材の剥 離面をHITACHI製SU8230でSEM観察したところ, Fig.11に示すように,上皮材と同様に,下皮材および 芯材ともにディンプルが形成されていた。下皮材と芯 材の剥離面をKEYENCE製3D形状測定器VR-3000で

Fig. 10 Bonding surfaces after 8th pass,

(a) lower liner material; (b) core material.

3次元測定したところ,下皮材では,Fig.12に示すように芯材の凹凸形状は潰れており,上皮材のような明確な転写は見られなかった。以上の結果から,芯材と下皮材の表面は微視的には塑性変形しており,異種金属同士が変形していることから,微視的にはBayらの冷間圧接の接合メカニズムが適用できると考えられる。

ここで、上皮材と同様にMnをマーカーとし、下皮 材の移着部をEPMA分析で可視化した。上皮材と同様 Fig. 13に示すように、下皮材には添加されていない Mnが検出された。また、パス数が増加することでMn



(a) Upper liner material

 $\begin{array}{c} 30 \ \mu m \\ \text{(b) Core material} \end{array}$





Fig. 12 Surface profiles on core material and lower liner material before and after rolling, (a) lower liner material; (b) core material.

濃度の高い領域が広がり,移着部が増えて接合部が広 がっていることを確認した。

3.4 芯材と皮材の界面観察

芯材と皮材の界面断面を島津製作所製EPMA-1610で 面分析したところ, Fig. 14に示すように芯材と皮材の 界面において酸化皮膜が局所的に分断されており,新 生面同士が接触していた。新生面同士が接触している 部分を日本電子製JEM-2100FでTEM観察したところ, Fig. 15に示すようにアルミニウムの接合界面ではナノ サイズの酸化物や異物を介さずに,アルミニウム合金 同士が固相接合していた。 3.5 アルミニウムクラッド圧延の接合メカニズム

1パス目において、ロール直下では面圧が高いため、 芯材と皮材の真実接触部が塑性変形することで酸化皮 膜が破れる。酸化皮膜が破れると新生面同士が接触し て固相接合することで凝着部が多く形成される。その 結果、ロールが通過した圧延出側では芯材と皮材がず れにくくなる。

一方, 圧延入側では面圧が低いため, 芯材と皮材表 面の微小凹凸同士が接触した真実接触部は塑性変形し にくく凝着部も少ない。その結果, 圧延入側では, 芯 材と皮材はずれやすい。

Fig. 16に示すように, 圧延された皮材は芯材と皮材 がずれにくい圧延出側ではなく, 芯材と皮材がずれや



Fig. 13 EPMA elemental maps showing concentration of Mn remained on bonding surfaces of lower liner material, (a) after second pass; (b) after 8th pass.



(a) Upper liner material vs core material

(b) Lower liner material vs core material

Fig. 14 EPMA elemental maps showing concentration of Mn obtained from the interface after 8th pass, (a) between core and upper liner material; (b) between core and lower liner material.

すい圧延入側に向けて延びていく。そのため、圧延は じめよりも圧延終わりの方が芯材と皮材のずれ量は大 きくなる。2パス目以降では、Fig. 17に示すように、 前パスで生成した凝着部の接合強度を越えないように 適正な圧下量をとることで凝着部が増えていく。

1パスで芯材と皮材が接合しないような場合でも接 合メカニズムは同じであり、芯材と皮材の表面が微小 に塑性変形することで皮材と芯材がずれないよう十分 な凝着部が形成され、クラッド材が接合すると考える。

4. まとめ

4.1 クラッド圧延中の材料流れ

未接合時は芯材と皮材が大きくずれるが接合後はほ ぼずれないことから、芯材と皮材の界面は、界面がず れやすい状態から界面がずれにくい状態へ遷移してい た。また,皮材の表面積拡大率は数%程度であり,一方, 芯材の表面積拡大率はほぼゼロであった。このことか ら,異種金属同士が変形する必要のあるBayの冷間圧 接の接合メカニズムは巨視的には成立していない。

4.2 芯材と皮材の破面観察

芯材と皮材の表面は微小に塑性変形しており,ディ ンプルが形成されていた。芯材と皮材ともに変形して いることから,Bayの冷間圧接の接合メカニズムは微 視的には成立している。また、皮材のディンプル形成 位置にて皮材に添加されていないMnが検出された。 このことから,芯材と皮材は機械的にではなく冶金的 に接合していた。さらには、パス数が増加することで Mnが検出された領域は広くなった。

4.3 芯材と皮材の界面観察

芯材と皮材の界面において,酸化皮膜が局所的に分 断され新生面同士が接触していた。また,新生面同士 が接触している部分では,ナノサイズの酸化物や異物 を介さずにアルミニウム合金同士が固相接合していた。







Fig. 16 Schematic diagram of roll bonding mechanism of aluminum clad.

4.4 アルミニウムクラッド圧延の接合メカニズム

以上の実験事実より、熱間圧延によるアルミニウム クラッド材では、芯材と皮材表面の微小凹凸同士が接 触した真実接触部が塑性変形することで、酸化皮膜が 破れ新生面同士が接触し、芯材と皮材が固相接合する と推定する。各パスにおいて、前パスで形成した凝着 部を破断させないよう適切な圧下率を設定することで 凝着部が増していき、クラッド材が接合する。

参考文献

- 1) Vaidyanath, L.R., Nicholas, M.G., and Milner, D.R.: British Welding Journal, 6-Jan. (1959), 13-28.
- 2) 角川清夫, 片岡忍, 寿憲夫: 第22回塑性加工連合講演会講 演論文集(1971), 477-480.
- 3) Wright, P.K., Snow, D.A., and Tay, C.K.: Metals Technology, **5**-Jan. (1978), 24-31.
- 4) Long, L., Nagai, K., Yin, F.: Sci. Technol. Adv. Mater., 9 (2008), 023001.
- 5) Bay, N.,: Journal of Engineering for Industry, 101-5 (1979), 121-127.
- 6) Bay, N., Clemensen, C., Juelstorp, O. and Wanheim, T.: Annals of the CIRP, 34 (1985), 221-224.
- 7) 田中英八郎, 吉識忠継: 軽金属, 8-3 (1958), 44-52.
- 8) G. Szabó: Archives of Metallurgy and Materials, 62-2B (2017), 1205-1208.
- 9) Wei Yang: "AN INVESTIGATION OF BONDING MECHANISM IN METAL CLADDING BY WARM ROLLING", DOCTOR OF PHILOSOPHY (2011).
- 10) King, W. H. and Owczarski, W.A.: Weld. J., 47 (1968), 444.
- 11) Qin Qin, Dao-tong Zhang, Yong Zang and Ben Guan: Advances in Mechanical Engineering, 7 (2015), 1-13.



鳥飼岳 (Gaku Torikai) (株)UACJ 自動車部品事業本部 製诰統括部



吉田 佳典 (Yoshinori Yoshida) 東海国立大学機構 岐阜大学 工学部 島根大学 次世代たたら協創センター (NEXTA)



浅野 峰生 (Mineo Asano) (株) UACJ 福井製造所 製品技術部



新倉 昭男 (Akio Niikura) (株)UACJ 自動車部品事業本部 モビリティテクノロジーセンター