

の共通認識が得られたように思う。蛇行解析シミュレーターは新しい設備設計の段階でアクチュエーターの設置位置決定に有効であるとの見解であった。ヒートバックル、クーリングバックル発生に関しては基本メカニズムは両者ほぼ同一であること、いずれも張力不均一による板座屈がロール面に乗りあげて、ある限界をこえると塑性変形をおこしわ発生となることが議論された。バックル発生位置は各社各様だがロール中央部が多い。走行安定化のための母材形状についても各社各様であるとの印象である。今後の高速化に向けては流体抵抗、流体巻き込みによる滑り、張力制御の低慣性高精度化、母材の真直性確保等を視野に入れて技術開発に取り組む必要性があらう。

最後に本討論会に多くの方が参加され、貴重な研究成果を公表いただいたこと、活発な討論により本会を成功裡に納めることができましたことについて深く感謝いたします。

合金化溶融亜鉛めっき鋼板の合金化反応と成形法

座 長 日新製鋼(株)鉄鋼研究所

広瀬祐輔

副座長 住友金属工業(株)鉄鋼技術研究所

若野 茂

合金化溶融亜鉛めっき鋼板(各論ではGA鋼板と略す)は、塗装後耐食性、成形性、溶接性などの総合的品質特性に優れているため、各種用途に使用されている。とくに近年、自動車ボディ用鋼板の高防錆化ニーズに伴い、めっき付着量の大きく、かつ高精度に制御されためっき層構造を有する合金化溶融亜鉛めっき鋼板が多用されるようになってきている。本討論会では、溶融亜鉛めっき浴中での初期反応を含む合金化反応の素過程、合金化反応に及ぼす鋼成分やめっき浴中添加元素の影響および合金化処理条件の影響、めっき層構造と成形性の関係およびその評価方法などについての研究成果を報告し、現状認識の集約とともに今後の研究課題を探ることを目的として、発表と討論を行った。以下に、講演要旨と討論の概要を述べる。

討41 (依頼講演)0.1mass%のAlを含有する亜鉛と鉄との合金化反応

(九州工業大学工学部 大西正己ほか)

拡散現象についてのフィックの法則以来の研究歴史と講演者の40年にわたる拡散による異相境界の移動の研究のアウトラインを述べた後、マルチプルマーカ―を利用した固体Zn(0.1mass%Al含有)とFeおよび溶融Zn(0.1mass%Al含有)とFeの拡散実験結果と

考察を報告した。加熱後の拡散対内には金属間化合物が存在し、Fe/化合物および化合物/Znの両界面でマルチプルマーカ―の屈折が観察された。Fe/化合物界面には、Fe原子と共に化合物結晶格子を構成するべくZn原子が到達する。Fe/化合物界面では同時に空孔が発生し、空孔は化合物/Zn界面に向かって移動し、Zn原子と位置交換する。空孔分あるいは空孔と位置交換したZn分だけの体積膨張とZn原子の一方拡散でマーカ―の屈折が説明できる。Zn原子の一方拡散を理解するための質疑応答がなされた。

討42 合金化溶融亜鉛めっき鋼板の初期合金化挙動

(川崎製鉄(株)鉄鋼研究所 磯部 誠ほか)

Ti-Nb添加IF鋼を用い、溶融亜鉛めっきまおよびめっき層中Fe濃度3%の合金化処理(460、490℃)後の合金層の観察結果をもとに、浴中Al濃度と関連させてGA鋼板の初期合金化挙動を報告した。浴中Al濃度が高い(0.15mass%)場合、Fe-Al合金層は粒状で下地鋼板の粒界上に偏在することにより、合金化の速い箇所を抑制し、均一な合金化が起こる。合金化はFe-Al合金層中を拡散して供給されたFeがFe-Al合金層上に δ_1 相を生成し、 δ_1 相がAlを固溶しながら成長して下地鋼面に達することにより始まる。

討43 合金化溶融亜鉛めっき鋼板製造プロセスにおける合金化反応と皮膜構造

(NKK総合材料技術研究所 稲垣淳一ほか)

Ti添加IF鋼と低炭素AK鋼を用い、溶融亜鉛めっきま(Al:0.04~0.20mass%、浴温:713~823K)の初期合金層生成状況を観察し、Fe-Al合金化反応、 δ 結晶生成反応、アウトバースト(Outburst)反応について考察し、さらに合金化処理過程で起こる合金相の成長について報告した。浴温が773K以下でフェライト粒内に生成する δ 結晶はFe-Al系合金相と浴との界面で核生成する。フェライト粒界で発生するアウトバースト反応は δ_1 相を主体とするが、発生初期に鋼板との界面に Γ 相が発生する。GA鋼板製造プロセスにおける合金化挙動はフェライト粒内反応と粒界反応の組合せて説明できる。

討44 極低炭素Ti添加鋼の溶融亜鉛めっき・合金化挙動に及ぼす地鉄結晶方位の影響

(住友金属工業(株)鉄鋼技術研究所 中森俊夫ほか)

Ti-Nb添加IF鋼を用い、溶融亜鉛めっきま(Al:0.056~0.24mass%、鋼板浸入温度:400~480℃)で形成された化合物相の形態観察と同定を行った。特定の条件下(Al:0.10mass%、浸入温度400℃)で生じる δ 相の形態は地鉄方位に依存し、 $\{111\}$ α 面では地鉄と時定配向関係を充たし、 $\{100\}$ 晶帯付近ではランダムな析出形態となることを報告した。また、この条件下では $\{100\}$ 、 $\{110\}$ α 面へ

の δ 相の析出は抑制されるが、合金化処理(500℃)過程での反応は $\{111\}$ α 面よりも促進される。

討45 合金化溶融亜鉛めっき鋼板の合金化挙動に及ぼす鋼種の影響

(新日本製鉄(株)八幡技術研究部 真木 純ほか)

Ti添加IF鋼と低炭素AK鋼を用い、溶融めっきま(Al:0.05~0.15mass%)で形成されたFe-Al-Zn三元系バリア層およびFe-Zn系合金層の観察結果と合金化処理(450~550℃)後のめっき層構造について、耐パウダリング性と関連させて報告した。Ti-IF鋼はFe-Al-Zn系バリア層がポーラスで反応活性点が多いため、合金化反応が一樣に進行し、層状の Γ 相が形成される。耐パウダリング性が劣る理由である。AK鋼は緻密なバリア層を生成するため、層状の Γ 相成長が抑制され、耐パウダリング性に優れる。

討46 極低炭素Ti系合金化溶融亜鉛めっき鋼板の合金化挙動に及ぼす鋼中P濃度の影響

((株)神戸製鋼所加古川製鉄所 浦井正章ほか)

Ti添加IF鋼の溶融亜鉛めっき(Al:0.13mass%)過程および合金化処理(600℃)過程での合金化挙動、特に Γ 相の成長抑制に及ぼす鋼中P濃度の影響について報告した。P濃度が0.010mass%以下の場合、溶融めっき段階でアウトバースト組織の生成が著しく、合金化処理の早期に Γ 相の成長が始まる。P濃度が0.025mass%以上の場合、アウトバースト組織が抑制され、Fe-Al合金層を介する合金化反応となるため Γ 相の成長が大幅に抑制される。

討47 合金化溶融亜鉛めっき鋼板の合金化挙動に及ぼす鋼種および浴中Al濃度の影響

(住友金属工業(株)鉄鋼技術研究所 荒井正浩ほか)

Ti添加IF鋼、P添加鋼およびTi-P添加IF鋼を用いて作製したGA鋼板(Al:0~0.18mass%、合金化温度500℃)について、新規に考案した断面試料調整法による観察などをもとに合金化挙動に及ぼす鋼種、浴中Al濃度の影響を報告した。合金化温度500℃の場合、浴中Al濃度によらず、Ti添加IF鋼では Γ 相の生成後に Γ_1 相が、P添加鋼およびTi-P添加鋼では Γ_1 相の生成後に Γ 相が生成した。P添加鋼およびTi-P添加鋼の合金化反応はTi添加IF鋼に比べて遅れる傾向にあった。P添加鋼のフェライト粒界にPが偏析し、粒界反応が抑制されるためであると考えられる。

討48 合金化溶融亜鉛めっき鋼板の合金層構造に及ぼすめっき浴中Mn濃度の影響

(日新製鋼(株)鉄鋼研究所 川口洋充ほか)

Ti添加IF鋼を用い、合金化処理が終了(η 相が消失)した時点での δ 相の存在の有無に及ぼす浴中Al濃度(0.06~0.18mass%)と浴中Mn濃度(0~0.76mass%)の影響を報告した。浴

中Al濃度と浴中Mn濃度のいずれも高くなるほど δ 相の生成は抑制される。この抑制効果は δ 相の包晶点が低下したためであると考えられる。めっき浴中にMnを添加することにより、低温短時間合金化処理で δ 相を消失させ、耐フレーキング性を向上させる可能性が示唆された。

前半討論

めっき浴中Alの添加効果はFe-Al-Zn系金属間化合物(X線回折では Fe_2Al_5)の初期形成と拡散バリアーとしての機能であること、および浴中Al濃度が低いほどアウトバースト現象が発生しやすいことは共通認識とし、まず、浴中Al濃度が高い場合にFe-Al-Zn系化合物層上に出現するFe-Zn系化合物のキャラクターゼーションと反応機構について活発な討論が行われた。鋼種の影響、めっき浴面立上り時のめっき層構造が凍結されないこと、研究アプローチの相異による実験条件の差などが複雑に絡み合い、全体像を理解するためには共通の基盤に立った研究活動が今一步必要であると思われる。

つぎに、鋼中Pの合金化反応抑制挙動について討論された。高P濃度で観察される局所的な柱状結晶の存在が特徴的であり、また、合金化温度500℃でのP添加鋼における Γ_1 相の優先成長が討議された。余談になるが、前回の討論会(1988年春/溶融亜鉛系合金めっき鋼板)に比べ合金相の観察写真の鮮明さ、微細さおよび微小部分分析や断面薄膜TEMを使用した微細構造の解析技術の進歩が印象に残った。本テーマもこれらの観察技術をさらに活用して、より多くの研究報告が発表されることを期待したい。

その他に、 δ 相の包晶点や浴中Mn添加効果に関する討論、個別の討論では尽くせなかった追加質疑応答、討論が行われた。

討49 (依頼講演) 表面処理鋼板の成形性

(理化学研究所素形材工学研究室 池 浩)

摩擦の変動と表面損傷は表面処理鋼板が有する特異な成形性支配因子と考えられる。摩擦特性あるいは「すべり性」に焦点をあて、表面処理鋼板の成形性の実態と評価法の動向について紹介した。評価法として①円筒工具による深絞り試験、②平板摺動試験、③絞りビード引抜き試験、④L型絞りビード試験、④'ビード付きU曲げ試験の特徴について解説した後、薄鋼板成形研究会WGで行った冷延鋼板と7種類の表面処理鋼板の実物ドア・インナー・パネルの成形例を示し、「すべり性」とは平面ひずみでの絞りビード、ダイ肩を介した材料流入であると考察した。厚目付きGA鋼板の「すべり性」改善の方法として、 δ 相を主体とするめっき層構造に制御すること、Fe系の上層めっきを付加すること、高潤滑防錆油の採用などが紹介された。実物ドア・インナー・パネルの成形例について質疑応答が行われた。

討50 合金化溶融亜鉛めっき鋼板の加工性に及ぼす合金層構造の影響

(川崎製鉄㈱鉄鋼研究所 高村日出夫ほか)

LHP(Liquidus Hot Pressing)法により作製した δ 、 δ_1 、 Γ 各単相合金から得られた特性調査結果およびこれをもとに定められたGA鋼板の合金相の判別方法を示し、浴中Al濃度、合金化処理条件を変化させたGA鋼板の合金層構造と成形性に及ぼす影響について報告した。 δ 相主体の合金層が形成されたGA鋼板は耐フレーキング性に劣り、 Γ 相が厚いほど耐パウダリング性が不良となる。溶融めっき時に形成されるFe-Al金属間化合物量が多いほど耐パウダリング性は良好で0.10mass%以上の浴中Al量が必要なこと、Fe量率が10mass%と同一でも合金化温度により合金層構造が変化することなど成形性の良好なGA鋼板を得るための条件が示された。

討51 合金化溶融亜鉛めっき鋼板の合金化挙動と成形特性

(新日本製鉄㈱名古屋技術研究部 中山元宏ほか)

めっき条件と合金化処理条件を種々変更して製造されためっき層構成の異なるGA鋼板について、成形時の剥離界面の同定、 Γ_1 相、 δ 相および目付量と耐剥離性の関係を報告し、Nb-Ti添加IF鋼を用いたGA鋼板の合金相の成長挙動に及ぼす浴中Al濃度、合金化温度、昇温速度およびNOFでの酸化量の影響について報告した。めっき層自体の耐剥離性を向上するためには Γ_1 相の生成を抑制する必要がある、高面圧下での摺動性を確保するためにはめっき表層の δ 相を抑制する必要がある。両立するめっき層の最高構造は δ_1 相主体である。 δ 相と Γ_1 相を抑制し δ_1 相主体のめっき層構造にするためには、めっき浴内での初期反応であるAlバリアー層の均一生成を促進するような合金化ヒートサイクルに制御することが重要である。

討52 合金化溶融亜鉛めっき鋼板の皮膜構造と耐パウダリング性

(NKK総合材料技術研究所 櫻井理孝ほか)

低炭素AK鋼を原板とし、CGLで製造(Al: 0.15mass%)した溶融亜鉛めっき鋼板を合金化処理(440~580℃)し、水冷、炉冷、風冷と組み合わせてめっき皮膜中のFe含有率が10mass%と一定になるように合金化時間を調節したGA鋼板の皮膜構造と耐パウダリング性の関係について報告した。この条件で作製したGA鋼板の耐パウダリング性は、合金化濃度が低いほど、高温合金化の場合でも冷却速度が遅いほど良好となる。 Γ_1 比($\Gamma_1/\Gamma_1+\Gamma$)が高いほどせん断変形時のめっき剥離強度が向上しているためと考えられる。

討53 合金化溶融亜鉛めっき鋼板のフレーキング発生挙動に及ぼす金型の表面特性の影響

(日新製鋼㈱鉄鋼研究所 青木智久ほか)

GA鋼板のフレーキングを実験室的に再現できる評価試験方法として、5Rの丸ビード金型のドロービード試験を報告した。丸ビード金型の表面硬度がHV:1000以上、表面粗さが $R_{max} 5\sim 10\mu\text{m}$ の範囲であることが条件である。この範囲外ではパウダリングや「むしれ」現象が発生する。この試験法を用いてGA鋼板の耐フレーキング性を評価し、フレーキングは δ 相と Γ 相が共存する場合に最も発生しやすく、また、付着量が多いほど発生しやすいことを示した。

後半討論と総合討論

最初に、トヨタ自動車㈱第8生技部鈴木裕氏よりユーザーコメントがあった。自動車ボディー用鋼板と塗装系の変遷、耐久性保証に対する考え方、GA鋼板を実際に利用する立場での問題点指摘と自動車メーカー側、鋼板メーカー側双方での改善取組事例などについてコメントした後、高潤滑防錆油に対する展望を紹介した。

その後、耐パウダリング性や耐フレーキング性などの成形性に及ぼすGA鋼板めっき層構造の影響について討論された。耐パウダリング性に対する Γ 相(Γ_1 相含む)の寄与、耐フレーキング性に対する δ 相の寄与は共通認識であった。 Γ 相と Γ_1 相の個別同定に関する討論も行われたが、 Γ_1 相の存在を確認していない報告者もあり、この点については今後の課題として残った。

その他、個別の質疑応答、討議を行った後、最後に成形性の良好なGA鋼板の製造法について講演者の見解を伺った。 δ 相と Γ 相をできるだけ抑制し、 δ_1 相主体とする方向に相異はないが、前半討論でもあったように鋼種の影響がきわめて大きく、また、合金化処理設備の特性もあり、一義的に整理することは困難であった。

本討論会は多数の参加者を得て、活発な討論が行われた。発表件数が多すぎて、時間的にタイトであったかもしれない。合金化溶融亜鉛めっき鋼板も原板は高純度IF鋼で高精度に制御されためっき層構造を有するようになった。高純度鋼との合金化反応およびそれに対する添加元素の影響について、個別に定量性を深める研究はこれからますます求められよう。反面、高純度化、高性能化に伴うコストアップも生じる。コストダウンを図りながら高性能化する表面処理屋からの提案はないものであろうか。またあらためて討論する機会が持てればと念じるしだいである。