

論文の要旨

題目：自動車用亜鉛めっき高張力鋼板のレーザー溶接技術に関する研究

(Study on laser welding technology of galvanized high-tensile strength steel sheets for automobile)

氏名 門 格 史

自動車軽量化の取り組みの一つとして、高張力鋼板・超高張力鋼板の利用がある。また、高張力鋼板は、防錆のため、表面にめっきが施された亜鉛めっき鋼板として使用されている。しかし、亜鉛めっき鋼板、高張力鋼板の溶接では、どちらにおいても課題がある。亜鉛めっき鋼板の重ねレーザー溶接では、溶接欠陥のない良好なレーザー溶接ができる鋼板間の初期間隙量の範囲が非常に狭い。その範囲からはずれる初期間隙量が狭い場合では、ピットやブローホールの発生、広い場合では溶け落ちの発生により溶接継手の強度が低下する。一方、高張力鋼板では、アーク溶接で溶接を行うと、HAZ部の軟化による静的強度の低下や溶接止端部の形状悪化により疲労強度の低下が生じる。そこで、本研究では、亜鉛めっき鋼板の重ねレーザー溶接および高張力鋼板の溶接における課題に対してレーザー加熱変形前処理およびホットワイヤ・レーザー溶接の提案をして、検討を行った。

レーザー加熱変形前処理とは、レーザー照射による鋼板の熱膨張および塑性変形を利用して、鋼板を下側に変形させて、鋼板間の間隙を制御する手法である。当該手法を亜鉛めっき鋼板の重ねレーザー溶接へ適用した場合、溶接前に初期間隙量を把握していなくても、初期間隙量がある程度の間隙範囲になっていれば、溶接前にレーザー照射することにより、上板を下側に変形させることで、狭間隙、広間隙のどちらの場合でも、欠陥が発生しない範囲に間隙を制御できて、溶接欠陥が発生しない良好な溶接継手の作製が可能となる。このことから、鋼板間の初期間隙量による溶接欠陥を防止する手法として期待ができる。

ホットワイヤ・レーザー溶接法は、ホットワイヤシステムとレーザーを組み合わせた溶接方法であり、低入熱・高能率溶接やワイヤ溶融と母材溶融の独立制御等の利点がある。当該溶接法を高張力鋼板・超高張力鋼板の溶接に適用した場合、低入熱溶接によるHAZ部軟化の抑制やワイヤ送給速度制御による止端部形状制御などにより、溶接部の静的強度や疲労強度の低下などの課題解決に期待できる。併せて亜鉛めっき鋼板の重ね溶接においても、ルート部を必要最小限の溶融により溶接できるため、ブローホール発生などの課題解決も期待ができる。

本研究では、第1編では、亜鉛めっき鋼板の重ねレーザー溶接へのレーザー加熱変形前処理の適用、第2編では、高張力鋼板の重ねすみ肉溶接へのホットワイヤ・レーザー溶接法の適用について検討を行った。適用検討の結果、亜鉛めっき鋼板の重ねレーザー溶接および高張力鋼板の溶接の課題に対して有効な手法であることが明らかになった。

第1編では、レーザー加熱変形前処理の亜鉛めっき鋼板の重ねレーザー溶接への適用について検討した。

基礎的条件の導出では、鋼板の変形挙動の調査、1枚板による適正入熱条件の導出、2枚板による鋼板間の間隙制御や本手法を用いた場合の溶接性について検討した。鋼板の変形挙動調査では、適正条件でレーザー照射すると、急激な温度上昇および板厚方向に大きな温度勾配を生じさせることにより、鋼板を大きく下側に変形させることが可能となることが示唆された。適正入熱条件の導出では、レーザー出力、スポット径、クランプ間距離を大きくして、加工速度を適正に設定する適正条件では、レーザー照射により鋼板を下側に大きく変形させることが可能であることが明らかになった。また、スポット径サイズに関わらず、適正なエネルギー密度となると変形量が大きくなることが明らかになった。鋼板間の間隙制御の検討では、適正条件によりレーザー加熱変形前処理を行った場合、レーザー加熱変形前処理位置から4mm離れた位置において、初期間隙量が広い場合、440MPa級高張力鋼板では初期間

隙量 0.7 mm, 780 MPa 級高張力鋼板では初期間隙量 0.8 mm において, また, 初期間隙量が狭い 0 mm の場合, 440 MPa 級高張力鋼板および 780 MPa 級高張力鋼板のどちらの場合でも, 溶け落ちやピット・ブローホールが生じない範囲に間隙制御できていることが明らかとなった. 本手法を用いた溶接性の検討では, 母材強度に関わらず, レーザ加熱変形前処理位置から少し離れた 4 mm 位置へレーザ溶接することにより, 初期間隙量 0 mm の狭間隙から 0.7~0.8 mm の広間隙まで, 母材破断する高い継手強度を得ることができた. 以上の結果から, レーザ加熱変形前処理を用いた間隙制御は可能で, 狭間隙, 広間隙のどちらにも有効であることが明らかになった.

実施工への向けた適性ビード配置の導出として, 1 枚板によるレーザ照射ビードの配置による鋼板変形への影響, 2 枚板による鋼板間の間隙制御や本手法を用いた場合の溶接性について検討を行った. レーザ照射ビードの配置の検討では, 連続した長いビードを用いて温度上昇範囲を確保して十分な変形量を得るだけでなく, 短いビードを組み合わせることで, 同程度の変形量を得られることがわかった. 鋼板間の間隙制御の検討では, ビード間隔 15 mm の長さ 20 mm の 2 本のビードを用いて適正条件でレーザ加熱変形前処理することで, 狭間隙および広間隙のどちらに対しても, レーザ加熱変形前処理の中央部において, 上下鋼板間の間隙を欠陥が抑制できる適正な範囲に制御できる可能性があることがわかった. 本手法を用いた溶接性の検討では, レーザ照射の間隔を適正に設定した 2 回の非連続の短いレーザ照射によるレーザ加熱変形前処理を行うことで, 狭間隙および広間隙のどちらの場合に対しても, 欠陥の発生しない適正な溶接ビードを得られることが明らかになった. ビード間隔 15 mm の長さ 20 mm の 2 本のビードを用いて, 適正条件でレーザ加熱変形前処理することで, レーザ加熱変形前処理の中央部に重ねてレーザ溶接を施工した場合, 初期間隙量 0~0.7 mm までの広い間隙範囲で, 溶接欠陥がなく母材破断する高い引張せん断強度を有する継手を作製できることが明らかになった.

第 2 編では, ホットワイヤ・レーザ溶接法の垂鉛めつき高張力鋼板の重ね溶接への適用について検討した.

ホットワイヤ・レーザ溶接におけるレーザスポット径および溶接速度と溶接ビードへの影響の検討では, 初期間隙量 0 mm の場合, 適正なレーザスポット径すなわちエネルギー密度および溶接速度で溶接を行うと, 良好なビードが形成できて, 母材破断する継手強度が得られることが明らかになった. また, 間隙が広い場合では, 鋼板間の間隙に対して, 適正なワイヤ送給量を設定することにより溶け落ちなどの溶接欠陥が発生しない良好な溶接ビードが得られることが明らかになった. 今回設定した条件では, 鋼板間の間隙 0.8 mm まで良好なビードが形成された. これらの結果から, 高張力鋼板の溶接で課題となる間隙裕度について, 適正溶接条件で溶接を行うことにより間隙 0 mm および間隙が広い場合のどちらにも対応可能であることが明らかになった.

ホットワイヤ・レーザ溶接法の溶接条件が静的強度に及ぼす影響について検討では, 間隙 0 mm の垂鉛めつき鋼板重ねすみ肉継手の溶接において, レーザ出力に応じた適正なエネルギー密度が得られるレーザスポット径および溶接速度を設定し, 当該レーザスポット径に応じた適正な量のワイヤを送給することで, ピット・ブローホールおよびスパッタの発生を抑え, 母材破断となる高強度な継手を得られることが明らかになった. また, ホットワイヤ・レーザ溶接法は, 従来の MAG 溶接で課題となっている入熱過多による HAZ 部軟化の抑制についても効果があることが明らかになった. 併せて, 鋼板間の間隙が 0 mm の場合でも, 溶接速度とワイヤ送給速度などの溶接条件を適切に設定することにより, 溶接欠陥は発生させずに, のど厚は十分確保できて, HAZ 軟化も最小限に抑えることが可能であり, そのことにより, 高い静的強度が確保できる溶接接手の作製が可能であることが明らかになった.

ホットワイヤ・レーザ溶接における溶接条件が疲労強度に及ぼす影響の検討では, ホットワイヤ・レーザ溶接では, ビード全長にわたって局所的な凸凹がない止端半径の大きなビードが安定して形成できていることが明らかになった. ホットワイヤ・レーザ溶接では, MAG

溶接に比べて、疲労強度が大幅に向上することが明らかになった。疲労試験後の破面観察やビーチマーク試験の結果から、止端半径が大きく、ビード全長に渡って凸凹のない滑らかなビードが形成できるおり、滑らかでビード方向に均一で安定した形状を有する止端部から疲労亀裂が発生するため、疲労強度が向上することが明らかになった。また、ホットワイヤ・レーザ溶接の溶接条件での比較は、止端半径が大きくできるワイヤ送給比が小さい条件の方が、疲労強度が向上することが明らかになった。一方、MAG溶接の場合、ホットワイヤ・レーザ溶接に比べて止端半径は小さく、ビードが凸凹としており、溶接ビード長全体にわたって、ビード表面および止端部にミクロな凸凹が形成されてことが明らかになった。また、MAG溶接は、ホットワイヤ・レーザ溶接と比べて、疲労強度は、大幅に低下することが明らかになった。疲労試験後の破面観察やビーチマーク試験の結果から、止端部におけるミクロな凸凹により局所的な高い応力集中が発生したため、早期に亀裂が発生したため、疲労強度が低下したことが明らかになった。