

溶接止端部へのレーザ照射および局部浸炭処理による疲労強度改善効果に関する検討

寺辻, 和陸
九州大学大学院工学府船舶海洋工学専攻

内村, 友哉
九州大学工学部技術部

後藤, 浩二
九州大学大学院工学研究院海洋システム工学部門

<https://hdl.handle.net/2324/7160652>

出版情報：溶接構造シンポジウム講演論文集．2023，2023-11．溶接学会
バージョン：
権利関係：



溶接止端部へのレーザ照射および局部浸炭処理による 疲労強度改善効果に関する検討

九州大学 大学院工学府 船舶海洋工学専攻 ○寺辻 和陸
九州大学 工学部技術部 内村 友哉
九州大学 大学院工学研究院 海洋システム部門 後藤 浩二

A study of the effects of laser irradiation and localized carburizing treatment
on the fatigue strength improvement of welded joints.

by Kazutaka TERATSUJI, Tomoya UCHIMURA, Koji GOTOH

1. 緒 言

船舶や橋梁等の大型溶接構造物の損傷形態は疲労破壊が大半を占める。特に溶接止端部は応力集中部となり、疲労亀裂発生の起点となりやすい。そのため、溶接止端部の疲労強度の向上に関する研究が盛んであるが、その多くは溶接施工後に実施される処理であり、作業工程の増加から生産効率の低下を招く恐れがある。これに対し、上村ら¹⁾は継手製造ラインにおいて溶接後引き続き施工可能な局所レーザ照射により、溶接ビード止端部の形状緩和と溶融部周辺の結晶粒微細化処理を施すことで、疲労寿命向上が期待できることを示している。

しかし、20 年以上という長期間での使用が想定される船舶や海洋構造物では、疲労寿命改善のために溶接止端部の結晶粒を微細化しても、表面部の腐食や摩耗という経年劣化により疲労寿命改善効果が消滅することが懸念される。船舶の構造部材に対しては、海水曝露環境には 1.0 mm、貨物倉横隔壁には 1.0 ~ 5.2 mm の腐食予備厚を考慮した設計が要求される²⁾。

本研究では、耐腐食や耐摩耗の観点から健全な浸炭層を形成するための条件探索、ならびに結晶粒微細化層を内部に形成することで疲労強度改善を試みた。

2. T 継手に対する健全な浸炭条件の傾向調査

Table 1, Fig. 1 ならびに Fig. 2 に示す条件にて、船体構造用鋼 KA32 を用いて T 継手を製作した。次に、T 継手片側の主板的溶接止端部に対し、先行研究³⁾により同定した Table 2 に示す条件で局所浸炭処理を行ない、溶融領域のマクロ観察を行った。各条件の代表的な溶融領域の観察結果を Fig. 3 に示す。

Table 1 Welding conditions.

Current [A]	Voltage [V]	Travel speed [cm/min]	Distance of wire aiming point [mm]	Torch direction angle [deg.]	Torch elevation angle [deg.]	Wire extension [mm]	Gas mass flow [L/min]	Welding consumables	Shield gas
220	36	38	0	0	40	20	20	MX-200 (φ 1.4)	CO ₂

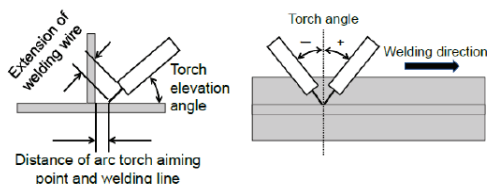


Fig. 1 Definition of arc welding condition.

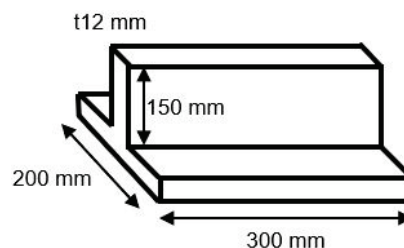
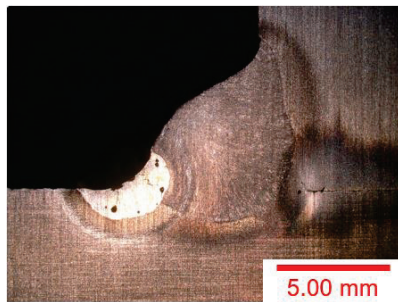


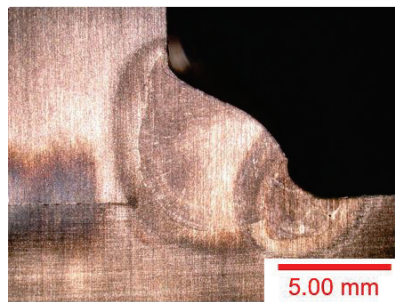
Fig. 2 Dimension of specimens used.

Table 2 Laser irradiation conditions.

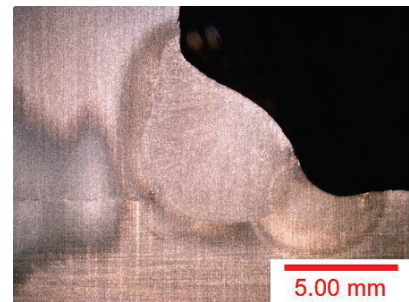
ID.	Laser power [kW]	Defocus distance [mm]	Travel speed [mm/min]	Paste (C:Si:H ₂ O)	Paste thickness [mm]	Laser angle [deg]	Shield gas	Gas mass flow [L/min]
1	1.5	-5	120	10:20:14	0.3	45 (Laser head angle with horizontal: LHA)	None	20
2							CO ₂	
3							MAG	
4					None			
5					CO ₂			
6					MAG			



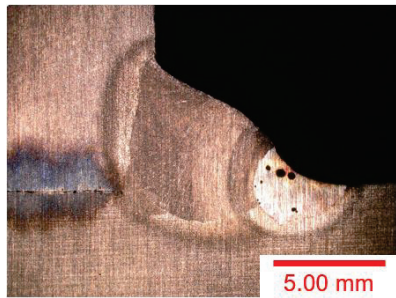
(a)ID.1



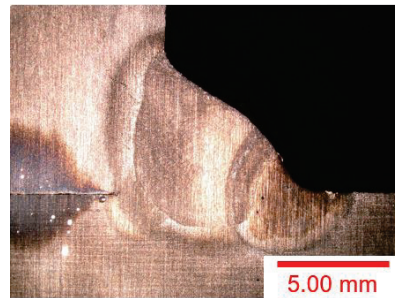
(b)ID.2



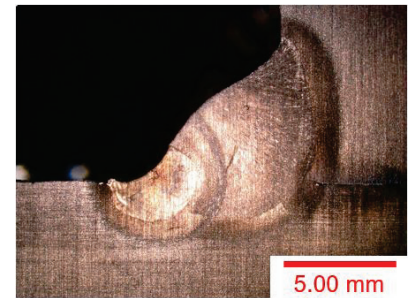
(c)ID.3



(d)ID.4



(e)ID.5



(f)ID.6

Fig. 3 Cross-sectional observation.

Fig. 3 (a)および(d)に示す結果より，レーザ照射時にシールドガスを使用しない場合は多数のポロシティが発生した．一方，レーザ照射時にシールドガスとして CO₂ ガスならびに MAG ガスを使用した場合である Fig. 3 (b), (c), (e), (f)では，ポロシティは大幅に減少し，MAG ガスを使用した場合が最も気孔欠陥が少なかった．また，炭素ペースト厚が薄い方が僅かながら気孔欠陥が減少した．疲労強度改善のためには，応力集中源となりうる気孔欠陥の発生抑制が重要であることを考慮すれば，MAG ガスで溶融領域を大気中から遮断し，ペースト中の炭素と鋼材中の酸素がなるべく反応しないよう，ペースト厚を薄くする必要があると考えられる．

3. レーザならびに局所浸炭処理の効果確認のための疲労試験

溶接止端部に対するレーザ照射ならびに局所浸炭処理による疲労強度改善の効果を確認するため，ISO 12108⁴⁾ならびに ISO/TR 14345⁵⁾に準拠して 4 点曲げ疲労曲げ試験を実施した．船体構造用鋼 KA を使用し，Table 1 の条件にて T 継手を製作し，Table 3 の条件にて主板側の溶接止端部にレーザ照射処理を行った．その後，Fig. 4 の定義にて溶接止端部の形状ならびに残留応力の測定を行った後，Fig. 5 に示す試験片を抽出した．また，疲労試験に供さなかった試験片を用いて，Fig. 6 の示す原点から溶接止端部にかけてビッカース硬さを測定した．疲労試験は，Fig. 7 に示すように試験片を支持し，応力範囲 300, 350, 400 MPa，応力比 0.1，周波数 10 Hz にて行った．

Table 3 Laser irradiation conditions.

ID.	Laser power [kW]	Defocus distance [mm]	Travel speed [mm/min]	Paste (C:Si:H ₂ O)	Thickness of paste [mm]	Shield gas	Laser angle [deg]
1	None (As-welded)	None	None	None	None	None	None
2	1.5	-5	120	None	None	None	45 (LHA)
3				10:20:14	0.3	MAG	

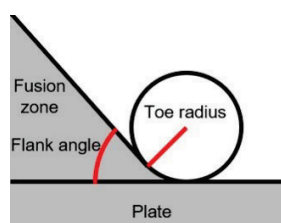


Fig. 4 Definition of weld toe.

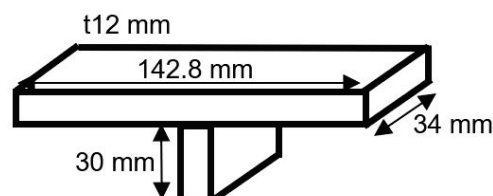


Fig. 5 Specimen geometry used.

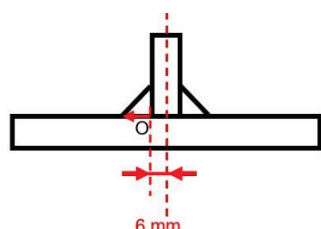


Fig. 6 Measuring location of Vickers' hardness test.

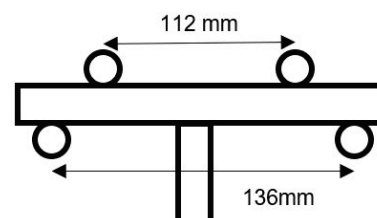


Fig. 7 Support points for 4-points bending fatigue test.

Fig. 8 に 4 点疲労曲げ試験による S-N 曲線, Fig. 9 に T 継手の残留応力測定結果 (両側の平均値), Fig. 10 にビッカース硬さ, Fig. 11~Fig. 13 に溶接止端部の形状スキャンならびに式 (1) ~ 式 (4) ⁶⁾ から算定した応力集中係数 (K_t) を示す. Fig. 8 より, いずれの応力範囲でも ID2 (レーザ照射のみ) ならびに ID3 (レーザ局所浸炭) は ID1 (溶接まま) より疲労破壊にいたるサイクル数を上回ったものの, ID2 と ID3 の比較では明白な傾向は見られなかった. Fig. 9 より, 原点から 30 mm 以降で, ID2 および ID3 は ID1 の残留応力を上回った. Fig. 10 より, ID1 ならびに ID2 の硬さはほとんど変化がなかった. 一方で, ID3 は原点から他条件よりも硬さが上回り, 局所浸炭処理された溶融領域ではより一層, 硬さが上昇した. Fig. 11~Fig. 13 より, ID2 ならびに ID3 のフランク角, 止端半径, 応力集中係数 (K_t) は ID1 より改善したことを確認した. 以上の結果から, 疲労強度を向上させる主要因は溶融止端部の形状緩和であると推察される. なお, 残留応力は溶融止端部から離れたところから各条件の変化が発生しなかったため, 疲労強度への影響は限定的と考えられる. また, ID3 の硬さは ID2 を大きく上回るものの, 溶接止端部の形状ならびに疲労破壊にいたるサイクル数に差がほとんど確認されないことから局所的な硬さの上昇の疲労強度への影響は軽微と考えられる.

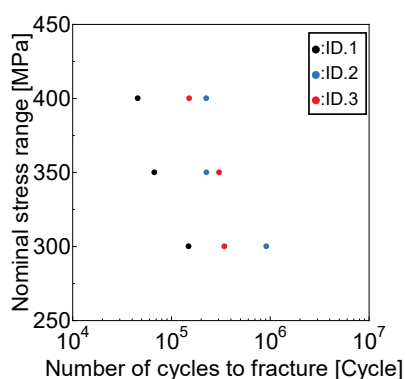


Fig. 8 Result of fatigue test.

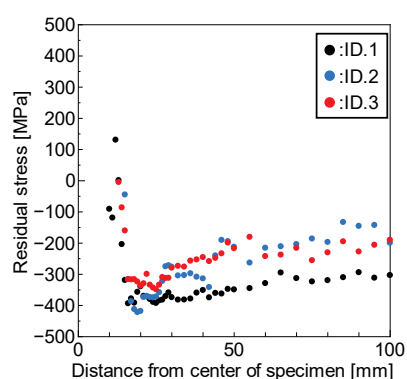


Fig. 9 Measured residual stress

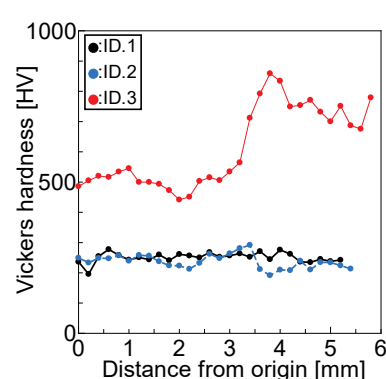


Fig. 10 Measured Vickers hardness

distributions.

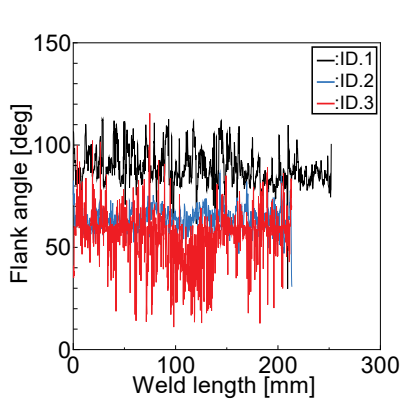


Fig. 11 Flank angle.

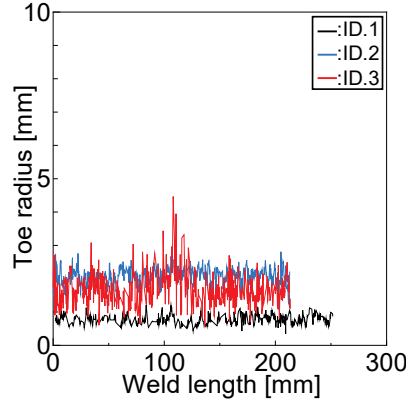


Fig. 12 Weld toe radius.

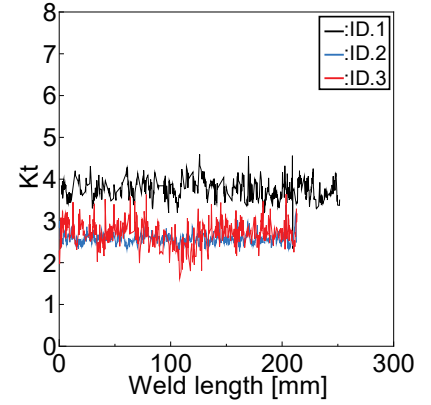


Fig. 13 Stress concentration factor (K_t).

$$K_t = 1 + \left\{ 0.629 + 0.058 \cdot \ln\left(\frac{S}{t}\right) \right\} \cdot \left(\frac{\rho}{t}\right)^{-0.431} \cdot \tanh\left(\frac{6h}{t}\right) \cdot f_\theta \quad (1)$$

$$f_\theta = \frac{1 - \exp\left\{-0.90\sqrt{\frac{W}{2h}} \cdot \theta\right\}}{1 - \exp\left\{-0.90\sqrt{\frac{W}{2h}} \cdot \frac{\pi}{2}\right\}} \quad (2)$$

$$W = t + h \quad (3)$$

$$S = t_p + 2h_p \quad (4)$$

K_t : Stress concentration factor, t : Thickness of main plate, t_p : Thickness of vertical plate,
 h : Leg length of vertical plate, h_p : Leg length of main plate side, θ : Flank angle, ρ : Weld toe radius.

4. 結言

本研究では、疲労強度改善と耐摩耗・耐腐食の観点から、T 継手に対する健全な局部浸炭処理が可能な条件探索および溶接止端部に対するレーザ照射、浸炭処理による疲労強度改善の効果を確認するための4点疲労曲げ試験を実施した、以下に結論を示す、

- 1) シールドガスの使用は疲労強度に悪影響を与えるポロシティの減少に有効であることを確認した。
- 2) 溶接止端部に対するレーザ照射ならびに局部浸炭処理は、疲労強度改善に有効であることを確認した。

謝辞

本研究の遂行にあたり、各種のご助言を賜りました久留米工業高等専門学校の森園靖浩教授に感謝の意を表します。本研究は JSPS 科研費 JP20H02372 の助成を受けたものです。

参考文献

- 1) T.Uemura. et al.: Fatigue strength improvement of welded joints using metal grain refinement technology by laser, 溶接構造シンポジウム 2019 講演論文集, (2019), 469-476. (in Japanese)
- 2) Nippon Kaiji Kyokai (ClassNK): Rules for the Survey and Construction of Steel Ship Contents Part CSR-B Common Structural Rules for Bulk Carriers, (2015).
- 3) Tamon, T. et al.: Basic Research on Local Carburizing Treatment by Laser Irradiation for Fatigue Strength Improvement of Welded Joints, Journal of The Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, (2022), Vol 34, 467-472. (in Japanese)
- 4) ISO 12108, Metallic materials-Fatigue testing-Fatigue crack growth method, (2002)
- 5) ISO/TR 14345 Fatigue-Fatigue testing of welded components-Guidance, (2012)
- 6) Tsuji, I: Estimation of stress concentration factor at weld toe of non-load carrying fillet welded joints, Journal of The Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, (1990), Vol 80, 241-251. (in Japanese)