

SCC 予防保全を目的とした SUS316L 鋼レーザー表面溶融処理部における高温割れ発生挙動に関する理論的検討

Theoretical Analysis of Hot Cracking Behavior in Melted Regions of Type 316L Stainless Steels by Laser Surface Melting Treatment for Maintenance to Prevent SCC

大阪大学大学院工学研究科 森 裕章 Hiroaki MORI Non member
西本和俊 Kazutoshi NISHIMOTO Non member

The solidification brittleness temperature range (BTR) and local strain in laser surface melted regions of Type 316L stainless steels were investigated in this study, to make clear the mechanism of solidification cracking in the region. The BTR in laser surface melted regions was estimated by the calculation of its upper and lower limits with using the dendrite growth model for Fe-Cr-Ni system and the thermo-dynamic analysis based on calculated phosphorus concentrations at dendrite boundaries in the melted regions, respectively. The local strain in the melted regions during solidification was calculated by the thermal elastic-plastic analysis with a finite element method. The BTR in laser surface melted regions was narrower with increasing the velocity. On the other hand, the increment of local strain in the melted regions during solidification was increased by the increase in the velocity. As a result of comparison between the BTR and local strain in the melted regions, the tensile strain in the melted regions increased more than the minimum strain of the BTR in the case of higher laser traveling velocities. This result indicates that solidification cracks are prone to occur in the melted region at higher laser traveling velocities.

Keywords: Type 316L stainless steel, Laser surface melting treatment, Hot cracking, Brittleness temperature range (BTR), Theoretical analysis

1. 緒言

オーステナイト (γ) 系ステンレス鋼 SUS316L 製原子炉配管の溶接継手部における粒界応力腐食割れの発生が問題となっており、同部位の補修技術とともにその予防保全手法の確立が求められている。その一つとして材料のごく表層のみをレーザー照射により溶融・急冷凝固させる、いわゆるレーザー表面溶融処理（以下、レーザー処理と略記する）が考えられる。しかしながら、溶融凝固部が γ 初晶凝固組織となった場合、フェライト (δ) 含有量が大幅に減少するため、高温割れが発生し易くなることが知られている[1]。とくに、P や S 等の不純物元素が多く含まれている場合、凝固脆性温度域 (BTR) が増大することから、割れ感受性がより増大することになる。一方、溶融凝固部における高温割れを解析する場合、前述の BTR あるいは延性低下温度域 (DTR) 等の材料要因だけでなく、力学的要因についても解析する必要がある。従来より溶接金属中に

おける高温割れについては溶接熱サイクル過程で生じる引張ひずみが BTR あるいは DTR の臨界値を越えることにより発生すると理解されてきた。しかしながら、実際の溶接部についてそれらを解析し定量的に評価するとともに鋼種や溶接条件による割れ感受性の変化を証明した研究は少なく[2]、レーザー処理部については全く検討されていないのが現状である。

そこで本研究では、 γ 系ステンレス鋼 SUS316L のレーザー処理部における高温割れの発生機構の解明とその予測手法の確立を目的として、同処理部における BTR およびひずみ挙動に関する理論的検討を行った。

2. 供試材料および実験方法

レーザー処理部の高温割れ感受性に及ぼす不純物元素 (P, S) と凝固モードの影響を明らかにするために、P+S量とCr/Ni濃度比をそれぞれ3水準に変量させた9鋼種の316L型ステンレス鋼実験溶解材を作成し実験に供した。それらの化学組成をTable1に示す。レーザー処理は定格出力2kWのLDレーザーを用いて、出力を2kW、焦点位置を試料表面、シールドガスをArとして、溶接速度を10~60mm/sに変化させて行った。同処理後、

連絡先: 森 裕章、〒565-0871 吹田市山田丘 2-1、大阪大学大学院 工学研究科 マテリアル生産科学専攻、電話: 06-6879-7543、e-mail: mori@mapse.eng.osaka-u.ac.jp

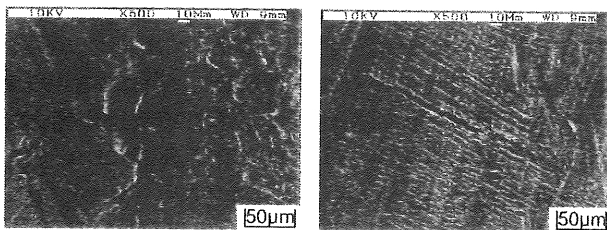
割れ発生の有無を顕微鏡により調査し、割れ数、総割れ長さを測定して割れ感受性を評価した。

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

Mark	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Co	B	N
SUS316LA	0.015	0.52	0.96	0.020	0.004	12.39	16.28	2.12	0.020	0.0003	0.027
SUS316LB	0.016	0.73	0.92	0.029	0.013	14.76	16.64	2.53	0.001		0.027
SUS316LC	0.016	0.54	1.18	0.029	0.012	13.12	16.27	2.09			0.031
SUS316LD	0.016	0.55	1.18	0.029	0.012	12.44	16.38	2.1			0.031
SUS316LE	0.016	0.73	0.91	0.020	0.004	14.84	16.57	2.48			0.026
SUS316LF	0.013	0.53	1.18	0.020	0.005	13.09	16.30	2.14			0.027
SUS316LG	0.015	0.72	0.90	0.019	0.010	14.87	16.52	2.48			0.032
SUS316LH	0.015	0.53	1.18	0.021	0.010	13.15	16.28	2.10			0.033
SUS316LI	0.015	0.53	0.99	0.021	0.010	12.45	16.34	2.10			0.033

3. 高温割れ発生挙動

レーザ処理部表面に発生した高温割れの観察結果を Fig.1 に示す。割れは発生位置によって(a)に示すビード中央の柱状晶会合部で発生した縦割れと(b)に示すデンドライト境界にその成長方向に沿って発生した割れに大別された。いずれの割れもその長さは数10 μ mから数100 μ m程度である。破面観察の結果をFig.2に示す。デンドライト状の組織が観察され、またその表面は非常に滑らかとなっている。このような特徴から、ビード内に発生した割れは凝固割れであると判断される。



(a) At bead center (b) At dendrite boundary

Fig.1 Surface appearance of laser surface melted region.

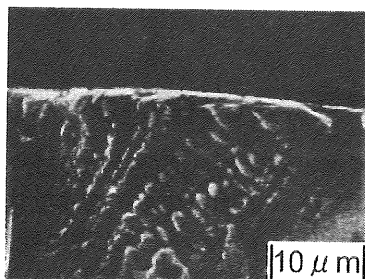
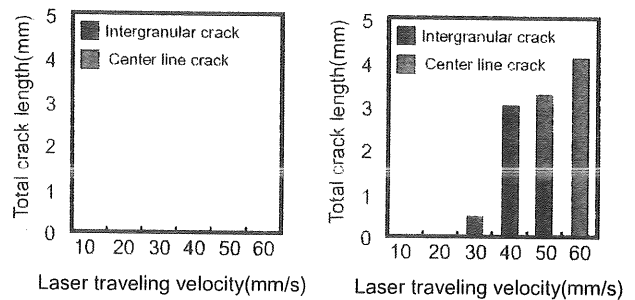


Fig.2 Fractured surface of the hot crack in laser surface melted region.

レーザ処理部の凝固割れ感受性を定量的に評価する

ため、各鋼種の同処理部に発生した割れの総割れ長さを測定し比較した。その結果を Fig.3 に示す。P+S 量の少ない SUS316LE には割れの発生が認められないのに対し、P+S 量の多い鋼種である SUS316LB では割れの発生が確認され、レーザ走行速度の増加に伴い総割れ長さが増加する傾向が認められる。この原因として、P+S 量が多い鋼種においてはこれらの元素の凝固偏析が顕著となり、固液共存温度範囲が拡大することによって凝固割れ感受性が増大したことが考えられる。



(a) SUS316LE (P+S : 0.02%) (b) SUS316LB (P+S : 0.04%)

Fig.3 Relationship between laser traveling velocity and total crack length of hot cracks in laser surface melted regions.

一方、タイプ別の割れ発生挙動をみると、レーザ走行速度の増加とともに、まずデンドライトの成長方向に沿った割れが発生し、さらにレーザ走行速度が増加するとビード中央に縦割れが発生することにより、デンドライト境界に沿った割れが減少する傾向を示す。最終的にレーザ走行速度を60mm/sとした場合、発生した割れはビード中央の縦割れがほぼ全てを占めるようになる。これはレーザ走行速度の増加に伴いビード中央の縦割れが発生することによって溶融凝固部の応力が解放され、その結果他の割れの発生が抑制されたものと推察される。

4. 高温割れ発生挙動の理論解析

レーザ処理部において発生した凝固割れ（ここでは縦割れを対象とした）の発生機構の解明を目的として、同割れ感受性に大きく影響を及ぼすBTRと凝固過程に溶融凝固部に付加されるひずみ挙動をそれぞれ有限差分法に基づく数値解析と有限要素法を用いた熱弾塑性解析により求め、それらの計算結果をもとに同部位での割れ感受性について検討を行った。

通常の溶接時におけるBTRを求める方法としてトランス・バレストレイン試験が用いられている。しかしながら、レーザ処理過程において同試験を実施するの

は溶融部の凝固速度があまりに大きいため、極めて困難である。そこで、本研究ではTIG溶接を用いたトランス・バレストレイン試験を実施してBTRを求め、同領域の上限に相当するレーザー処理時の凝固開始と下限値である凝固完了の温度をそれぞれ理論解析により算出し、それらの結果に基づきレーザー処理におけるBTRの推定を試みた。各鋼種に対して種々の付加ひずみ条件でトランス・バレストレイン試験を行い、凝固割れ発生温度域から通常のアーク溶接時のBTRを求めた。凝固開始温度は急冷凝固過程でのデンドライトの成長に関する理論モデルであるKurz-Giovanola-Trivediモデル (K-G-Tモデルと記す) [3]を用いて、デンドライト先端温度を算出して求めた。凝固完了温度は、デンドライトの断面形状を六角形と仮定し、有限差分法を適用した理論モデル[4]を、急冷凝固過程に応用して凝固偏析挙動の理論解析を行った後、得られた凝固偏析量(ここでは含有量の多いPを対象とした)から、熱力学計算ソフトThermo-Calcを用いて求めた。トランス・バレストレイン試験により得られたTIG溶接時のBTRの実測結果と前述の凝固開始および完了温度の計算結果を基に、レーザー処理部におけるBTRを推定した結果をFig.4に示す。これらの結果より、TIG溶接部に比べてレーザー処理部の固液共存温度域は凝固完了温度が上昇するため狭くなることがわかる。また、レーザー走行速度の増加とともにその傾向はより顕著となる。

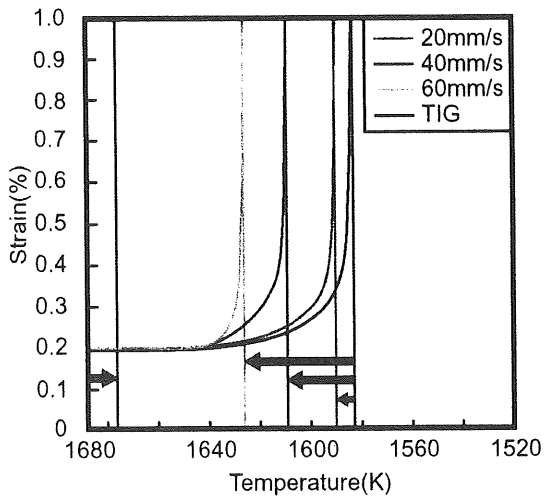


Fig.4 Solidification brittleness temperature ranges estimated in laser surface melted regions (P+S : 0.04%).

レーザー処理部における凝固割れ感受性を評価するためには、同処理部における BTR と同処理過程での溶融凝固部におけるひずみ挙動を比較する必要がある。しかしながら、レーザー処理部におけるひずみ挙動を実

験により測定することは困難である。そこで本研究では有限要素法による熱弾塑性解析によりレーザー処理過程での溶融凝固部におけるひずみ挙動の算出を試みた。計算には溶接変形解析専用プログラム Quick Welder を用いた。凝固開始から完了までにビード中央にレーザー走行方向に対して垂直方向に加わるひずみを解析するために、凝固開始温度である 1678K におけるひずみを 0%とし、その時点での要素サイズを基準として凝固過程での全ひずみの変化を求めた。前述の BTR の推定結果と熱弾塑性解析による溶融部内中央でのひずみ挙動の計算結果を比較した。その結果を Fig.5 に示す。レーザー走行速度の増加に伴いレーザー走行方向に垂直の引張りひずみ量は大きくなり、凝固過程でのひずみの増加度(ひずみ速度)も大きくなることわかる。ひずみ曲線と各鋼種における BTR を比較すると、P+S 量が 0.04%、レーザー走行速度が 60mm/s の条件において BTR の臨界曲線とひずみ曲線が交差していることがわかる。この結果は溶融凝固部中央において割れが発生することを示唆している。実際に、P+S 量が 0.04%の鋼種においてはレーザー走行速度が 60mm/s の条件でビード中央に縦割れが発生していることから、本解析結果は実現象を理論的に裏付けるものといえる。

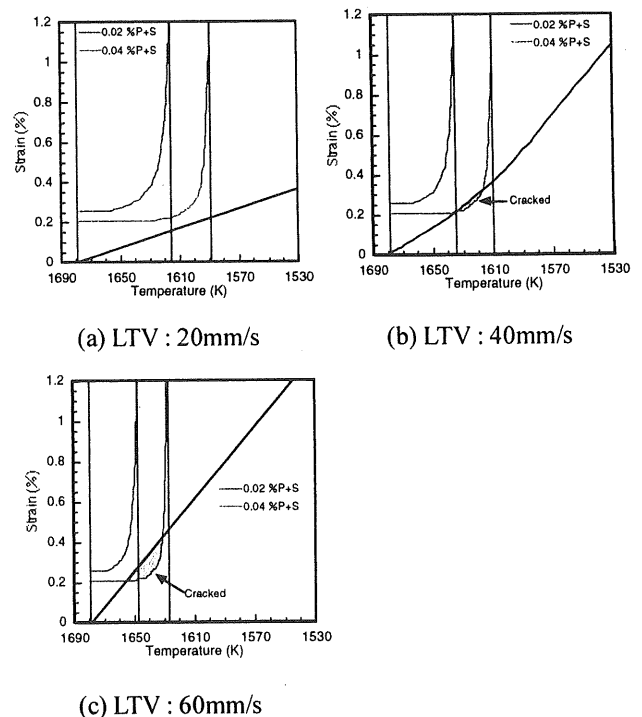


Fig.5 Comparison between solidification brittleness temperature ranges and strain curves in laser surface melted regions (LTV : Laser traveling velocity).

5. 結言

本研究では、SUS316L 鋼のレーザー表面溶融処理部における高温割れ発生機構の解明を目的として、同処理部における凝固脆性温度域 (BTR) と溶融凝固過程でのひずみ挙動を解析した。その結果、P、S の含有量が高い鋼種では同処理部において多数の凝固割れが発生し、その傾向はレーザー走行速度の増加とともに顕著となることが明らかとなった。また、レーザー走行速度が低い条件ではデンドライトの成長方向に沿った割れが多く発生し、レーザー走行速度の増加とともにビード中央での縦割れの発生が顕著となる傾向が認められた。同処理部の BTR を凝固理論および凝固偏析理論に基づく数値解析により推定した結果、レーザー走行速度の増加にともない温度域が狭くなることがわかった。同部位における BTR の推定結果とひずみ挙動の熱弾塑性解析結果を比較することにより割れ発生の可否を評価した結果、ビード中央においてはレーザー走行速度の高い条件下で BTR の臨界曲線とひずみ曲線が交差することが明らかとなった。この結果は、同条件下でレーザー処理部に縦割れが発生することを示唆しており、実験事実を理論的に裏付ける結果が得られた。

参考文献

- [1] Lippold, J.C., "Solidification Behavior and Cracking Susceptibility of Pulsed-Laser Welds in Austenitic Stainless Steels", *Welding Journal*, Vol.73, No.6, 1994, pp.123s-139s.
- [2] M.Shibahara, H.Serizawa and H.Murakawa., "Numerical Simulation of Hot Cracking in Welding Using Temperature Dependent Interface Element, Proceedings of the 7th International Symposium of Japan Welding Society Vol.2, November 2001, pp.1075-1080.
- [3] Fukumoto, S. and Kurz, W., "The δ to γ Transition in Fe-Cr-Ni Alloys during Laser Treatment", *ISIJ International*, Vol.38, No.1, 1998, pp.71-77.
- [4] K.Nishimoto, H.Mori, K.Esaki, S.Hongoh and M.Shirai, "Effect of Sulfur and Thermal Cycles on Reheat Cracking Susceptibility in Multi-pass Weld Metal of Fe-36%Ni Alloy", *IIW Doc.IX-1934-99*, July 1999.