② Ni 基耐熱超合金レーザー溶接部の溶接割れ現象とその割れ発生機構*

篠崎 賢二**, 羅 湘軍***

Phenomenon and Mechanism of Weld Cracking of Ni-base Superalloys During Laser Welding*

by Kenji SHINOZAKI** and Xiangjun LUO***

篠崎 賢二

羅 湘軍

キーワード：Ni 基耐熱超合金，レーザー溶接，液化割れ，割れ発生機構，インコネル 718，粒界液化，組成的液化，モデリング，NbC，高温ひずみ

1. はじめに

耐熱，耐食材料として使用される Ni 基耐熱超合金の溶接施工には，従来より TIG 溶接，MIG 溶接，被覆アーク溶接などが主として使用されている¹⁾。

近年，レーザー発振機が高出力化し，しかも比較的安価になったこともあり，レーザー溶接の需要が増大している。レーザー溶接は，従来，Al 合金やステンレス鋼などに適用されるケースが多かったが，高精度化，高信頼性化，高能率化などが期待されるため Ni 基耐熱超合金への適用も検討され始めている。しかしながら，この種の合金に対してレーザー溶接を適用した場合の基本的な溶接現象，溶接上の問題点などは十分に把握されていない。

そこで，本報告では，CO₂レーザー溶接を Ni 基耐熱超合金 Inconel 718 に適用した場合の溶接部に起こる問題点について，主として，溶接割れ現象の観点から検討を行った一連の研究結果²⁻⁵⁾をまとめた。

2. レーザ溶接における溶接割れ現象

2.1 割れ発生に及ぼす溶接条件の影響

図 1 は板厚 2 mm の Inconel 718 合金を CO₂レーザーによりビード溶接した場合に見られた溶接割れの代表例である。割れ長さは 100μm 程度であり，溶融境界線に隣

接した HAZ で発生している。いずれの溶接条件においてもこのような割れは溶接金属部では発生しておらず，全て HAZ で発生している。

図 2 は，この合金の割れ発生状況を各ビード断面での割れ個数とレーザー出力および溶接速度との関係で示したものである。図中のハッチング線より左の領域は，貫通したビードが得られる条件範囲である。この領域内では，割れは，低速度側に比べ高出力，高速度側で多く発生する傾向がある。

2.2 ビード断面形状と割れとの関係

レーザー溶接ビードの断面形状は，模式的に図 3 に示すように，表面ビード幅が裏面ビード幅より広くなるシャンパングラス状あるいはネイルヘッド状となる。ビード断面形状を図 3 に示すように領域分けした場合，例えばレーザー出力 3 kW，溶接速度 2 および 3 m/min の場合には，割れは図 4 に示すように Region 2，すなわち，ネイルヘッドの首下付近で極めて多く発生することがわか

図 1 Inconel 718 のレーザー溶接熱影響部に見られる溶接割れ

*原稿受付 平成 11 年 7 月 9 日

**正 員 広島大学工学部 Member, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Hiroshima University

***学生員 広島大学大学院 Student Member, Graduate School of Engineering, Faculty of Engineering, Hiroshima University

図2 Inconel 718 の溶接割れの発生状況に及ぼすレーザー出力と溶接速度の影響

図3 レーザ溶接ビード断面の領域分け

図4 ビード断面の領域別に見た溶接割れ発生状況

る。ビード断面形状の特徴を表すパラメータとして、

Region 2 と 3 の境界部における溶融境界線の曲率半径 ρ を用い、割れ発生数との関係を調べた。その結果、図 5 に示すように、 ρ が約 1.1 mm 以下で割れが急に発生しやすくなっており、割れ発生の有無を決める限界の曲率半径 (ρ_{cr}) が存在することがわかる。

これより、レーザープロセス条件をコントロールし、Region 2 と 3 の境界部における溶融境界線の曲率半径を ρ_{cr} 以上にすれば、溶接割れを防止できると考えられる。

3. 溶接割れ発生機構

3.1 割れ破面形態

図 6 は図 1 に示した HAZ での割れの典型的な破面形態である。これより、破面は粒界破壊であり、表面が滑らかで丸みを帯びた凹凸状の組織となっており、割れが液化割れであることを示唆している⁶⁾。

3.2 粒界液化現象

Inconel 718 の TIG 溶接時に発生する液化割れは、粒

図5 Region 2 における溶融境界線の曲率半径と割れ数との関係

図6 溶接熱影響部の割れの破面形態

界上のNbCに起因した局部溶融現象にともなう粒界液化が原因であると報告されている^{7,8)}。液化割れ破面解析の結果、レーザ溶接の場合もTIG溶接の場合と同様に、液化割れはNbCに起因した粒界液化現象が関与していることが推測された²⁾。粒界液化現象に影響を及ぼす因子として、材料的には、結晶粒径、NbCの粒子径および量などが、またプロセス的には加熱速度、冷却速度などが挙げられるが、これらの因子の影響をレーザ溶接のように急峻な溶接熱サイクルが付与される場合に実験的に明らかにするのは難しい。そこでNbCの局部溶融による粒界液化現象に及ぼすこれら諸因子の影響を理論的に検討した^{3,4)}。

NbCに起因した局部溶融現象にともなう粒界液化は、図7に模式的に示すように、加熱過程でNbC/マトリックス界面に形成された液相が、昇温とともにその量を増

図7 粒界液化現象の模式図

しながら、同時に、粒界へ浸入することにより起こる現象であり、さらに、冷却過程では、これらの液相が次第に凝固すると考えられる。このような粒界液化モデルに基づき粒界液化過程を、NbCの固溶段階、局部溶融段階および凝固段階に分け定式化を行った。

NbCによる局部溶融現象は、図8に示すような組成的液化モデルで説明されている⁹⁾。図8(a)にInconel 718合金の γ マトリックスとNbCとの擬似二元系状態図の模式図を示す。縦軸はNbの濃度である。また、図8(b)、(c)および(d)は、固溶段階、局部溶融段階および凝固段階におけるNbCおよびマトリックス中のNb濃度分布を示す。図8(a)においてInconel 718合金中のNb濃度を C_0 とすると、平衡的に加熱する場合、 γ マトリックス中のNbCは T_S で完全固溶し、 T_P で液相が出始める。ところが、加熱速度が速くなり、非平衡的に昇温する場合、 T_S においてNbCが完全固溶せず、 T_S を超えても、各相の界面では局部平衡が成り立つとすれば、図8(b)に示すような濃度分布でNbCは残留し、さらに昇温すると、 T_E においてNbCと γ マトリックスとの共晶反応により、図8(c)に示すような濃度分布で液相がNbCと γ マトリックスの界面に形成され、この液相が昇温とともに広がる。凝固過程では図8(d)に示すように、局部溶融により形成された液相は冷却とともに、凝固が進み、その濃度に変化し、 $L+\gamma+NbC$ の共晶組成、 C_E に達した後共晶凝固する。

以上の組成的液化機構に基づくNbCの局部溶融理論を適用し、二次元粒界液化解析を行った。

図9に、NbCの粒子半径を $2\mu\text{m}$ 、加熱速度を 100 K/s 結晶粒径を $100\mu\text{m}$ とした場合の、粒界へ浸入した液相の長さ、 L （以後、粒界液相長さとして略す）およびNbC周辺のマトリックスへ拡がった液相の幅、 W に及ぼすピーク温度の影響について計算した結果を示す。 L 、 W

図8 NbCの組成的液化機構の模式図

(a) γ -NbC擬似二元系平衡状態図、(b) 固溶段階のNbの濃度分布、(c) ピーク温度 T_P におけるNbの濃度分布、(d) 凝固段階でのNbの濃度分布

図9 粒界への液相浸入に及ぼすピーク温度の影響

図10 粒界液相長さに及ぼす加熱速度の影響

ともに、1439 Kよりピーク温度の増加とともに増加し、1470 K以上では、LがWに比して大きくなることより、液相の粒界への浸入速度が速くなり、液相の粒界浸入が顕著になることがわかる。

ピーク温度を1540 Kとした場合の粒界液相長さに及ぼす加熱速度の影響を図10に示す。なお、図中にレーザー出力3 kW、溶接速度2 m/minの条件で溶接した時の熱伝導計算による融点1617 Kから局部溶融開始温度1439 Kのピーク温度範囲における加熱速度の範囲を併せて示している。これより、粒界液相長さは、加熱速度10～5000 K/sの範囲では、ほぼ一定であるが、加熱速度5000 K/sを越えると次第に減少する傾向にある。これは加熱速度の増加とともに、液相が浸入する時間が短くなるためと考えられる。また、本実験で用いたレーザー溶接条件

図11 溶融境界部がピーク温度に到達した直後の主塑性ひずみ量 (ϵ_{p1})、これと直交する塑性ひずみ量 (ϵ_{p2}) 並びに板厚方向の塑性ひずみ量 (ϵ_{py}) のビード表面から裏面にかけての変化

図12 溶融境界線より0.2 mm離れた位置での ϵ_{p1} および ϵ_{p2} に及ぼすネック部の曲率半径の影響

での加熱速度範囲では、NbCの局部溶融にともなう粒界液化が起こり得ることがわかる。

3.3 HAZの高温変形挙動

図4および5に示したように液化割れは、ビード断面ネック部付近で多く発生し、そのネック部の曲率半径が小さいと割れやすかった。この理由を明らかにするため、完全弾塑性体と仮定し、レーザー溶接部の熱弾塑性解析を行った⁹⁾。液化割れは、液化した粒界に変位が付加されることにより発生するため、高温時の塑性ひずみ量でその変位量を評価した。

図11は溶融境界部がピーク温度に到達した直後のネック部の曲率半径を0.25 mmとした場合の溶融境界

線から 0.2 mm 離れた位置における、主塑性ひずみ量 (ϵ_{p1})、これと直交する塑性ひずみ量 (ϵ_{p2}) 並びに板厚方向の塑性ひずみ量 (ϵ_{py}) のビード表面から裏面にかけの変化を示す。 ϵ_{p1} は溶融境界線にほぼ垂直方向に発生する。これより、図 3 で示した Region 2 の領域で ϵ_{p1} が高くなることがわかる。また、図 12 は、溶融境界線より 0.2 mm 離れた位置での ϵ_{p1} および ϵ_{p2} に及ぼすネック部の曲率半径の影響を示す。これより、ネック部の溶融境界線の曲率半径が小さいほど、いずれのひずみ量も大きくなる傾向が認められる。このように図 11 および 12 の結果は、図 4 および 5 の傾向と良く対応しており、液化割れが発生する位置は高温時に力学的にも厳しい状態になっていると推察される。

以上の結果より、割れ発生機構として以下のようなことがわかった。すなわち、Inconel 718 をレーザ溶接した場合、2 m/min を越える溶接速度では、ネイルヘッド状の溶け込み形状となり、そのネック部近傍の HAZ では NbC の局部溶融現象に伴う粒界液化が起こり、また、この部分は高温時に他の溶融境界近傍の領域に比べて大きな変位が付加されるため、液化割れが発生し易くなる。

4. お わ り に

Ni 基耐熱超合金にレーザ溶接を適用した場合の問題

点の一つとして、溶け込み形状に関係した HAZ での液化割れがあげられた。しかも、この割れは、レーザ溶接が得意とする高速溶接で発生しやすいことから、Ni 基耐熱超合金にレーザ溶接を適用するにあたっての今後の課題と考えられる。

参 考 文 献

- 1) 篠崎：超合金の溶接・接合の要点，—Ni 基超合金を中心として—，溶接技術，43-8 (1995)，60
- 2) 篠崎，羅，有吉，黒木，白井：Inconel 718 レーザ溶接性に及ぼす溶接条件の影響，本会論文集，17-2 (1999) 2，279-285
- 3) 羅，篠崎，吉原，黒木，白井：Inconel 718 合金の HAZ における粒界液化，本会論文集，1999，投稿中
- 4) 羅，篠崎，吉原，黒木，白井：二次元粒界液化モデルによる粒界液化現象の解析，本会論文集，1999，投稿中
- 5) 篠崎，黒木，羅，吉原，奥本，白井：溶接熱影響部におけるひずみ分布と液化割れの関係，本会講概，64 (1999)，100-101
- 6) B. Weiss, G. E. Grotke and R. Stickler: Physical Metallurgy of Hot Ductility Testing, Weld. J., 49-10 (1970), 471s
- 7) 中尾，篠崎，路：Ni 基耐熱合金の高温割れに関する研究—高温割れ感受性評価組成パラメータの導出—，第 105 回溶接冶金研究委員会資料，WM-1130-86 (1986)
- 8) R. G. Thompson, J. J. Cassimus, D. E. Mayo and J. R. Dobbs: The Relationship between Grain Size and Microfissuring in Alloy 718, Weld. J., 64 (1985), 91s
- 9) J. J. Pepe and W. F. Savage: Effects of Constitutional Liquation in 18-Ni Maraging Steel Weldments, Weld. J., 46 (1967), 411s

国際会議のご案内

会議名：High Temperature Capillarity-2000 (高温毛细管現象-2000)

日 時：2000 年 11 月 19-20 日

場 所：倉敷市 ホテルハイザ倉敷

主 催：大阪大学接合科学研究所

内 容：高温溶湯のキャピラリティ (毛细管現象) の特性

(表面張力，界面張力，濡れ，付着仕事など)

材料プロセスにおけるキャピラリティ

接合におけるキャピラリティ

連絡先：〒 567-0047

大阪府茨木市美穂ヶ丘 11-1

大阪大学接合科学研究所

野 城 清