

肉盛溶接による金型補修に関する研究 (第2報)

星野 昌子・勝又 信行・石田 正文・佐野 正明

Research on Repairing Die with Overlaying (2nd Report)

Shoko HOSHINO, Nobuyuki KATSUMATA, Masafumi ISHIDA and Masaaki SANŌ

要 約

高品質で安定した金型補修技術の確立を目的に、溶接変形が少なく高速深溶込みが期待できる YAG レーザ溶接機を用い、レーザー溶接の最適化について検討した。前報にて溶接部に残留引張応力を確認し、本年度は応力緩和を目的にレーザー溶接の後熱処理の影響について検討した。

その結果、後熱処理を行った場合、電気炉による熱処理では残留引張応力がレーザー溶接直後の 557MPa に対して 233MPa と低下し、シャルピー衝撃試験による衝撃値も母材と同程度であることが分かった。また、新たな後熱処理方法としてデフォーカスさせたレーザー照射による熱処理法を検討した結果、残留応力においては溶接部表面に対して圧縮応力が付与されることが分かったが、衝撃値は未処理材と同程度であった。

1. 緒 言

今日のものづくり産業において、プラスチック成形、プレス、ダイカスト等、金型を用いる製造プロセスは不可欠である。金型を使用する際、製造中に発生する磨耗、亀裂等の補修や設計変更等の理由から、金型表面に肉盛溶接を施して対応することが日常的に行われている。現状では、金型の溶接作業は経験に基づいて行われており、溶接部の品質が不安定となりやすい。このような補修金型は、使用を再開しても早期に再び欠陥が発生しやすく、高品質で安定した溶接補修技術の確立が求められている。

本研究では、金型溶接補修技術の最適化を図り、高品質で安定した金型の補修技術の確立を目的とする。溶接手段には、溶接変形が少なく高速深溶込みが期待できるレーザー溶接に注目し、金型へのレーザー溶接の適用を検討した。前報ではレーザー溶接部の基本特性について評価を行い、溶接部境界に引張の残留応力を確認した¹⁾。

アーク溶接などの入熱量の多い溶接では一般に溶接部に引張の残留応力が存在することが知られている。通常アーク溶接後に、溶接部の歪み取り・残留応力緩和を目的として予熱処理または後熱処理などの溶接部の熱処理を行うことが一般的である²⁾。予熱処理は溶接金属及び熱影響部の硬化、靱性の劣化、低温割れ防止のために行われ、後熱処理は残留応力の緩和、溶接部の延性、切り欠き靱性の向上および水素除去等の効果がある。

肉盛補修用のレーザー溶接では入熱が瞬時に高速冷却するため、熱歪みが少ないことから一般的に予熱処理・後熱処理が不要であるとされてきた³⁾。しかし前報にある

ように溶接部に引張残留応力が確認されたため、熱処理により溶接部の応力緩和の必要がある。

そこで本年度はレーザー溶接での後熱処理に注目し、その影響について検討した結果について報告する。さらに残留応力の発生を少なくするためにレーザースポット径を変化させてデフォーカスし、入熱を広範囲に分散させた時の溶接部の評価を行った結果についても報告する。

2. 実験方法

2-1 YAG レーザ溶接機

一般的なレーザー溶接には CO₂ レーザ(波長: 10.6μm)や YAG レーザ溶接機(波長: 1.06μm)が用いられているが、YAG レーザは吸収率が高く、効率の高い溶接が可能である。特に、小出力 YAG レーザは、低入熱のため溶接時に発生する熱ひずみが少なく、微細な金型補修には適している。今回用いた YAG レーザ溶接機の概要を表 1 に、外観を図 1 に示す。

表 1 YAG レーザ溶接機の概要

機種名	TL-150S (株)テクノコート製
レーザー発振方法	ランプ励起連続パルス発振
レーザー波長[nm]	1064
平均出力[W]	150
パルス幅[ms]	0.5~20
周波数[Hz]	0.5~15

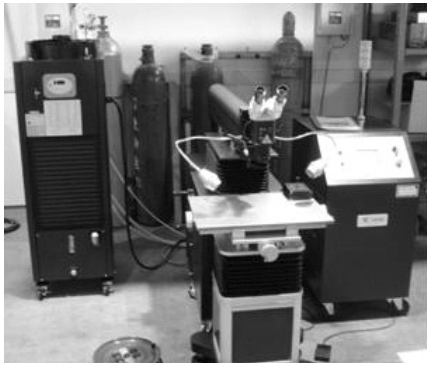


図1 YAGレーザー溶接機

2-2 試験条件

本研究では、ダイカスト用金型、プラスチック成形金型にも多く使用される合金工具鋼 SKD61 を使用した。

以下、後熱処理条件と多層盛溶接部評価における試験条件を記す。

2-2-1 後熱処理条件の検討

後熱処理条件の検討にあたり、多層盛による各層の影響をなくすため、表面にビードオンプレートにて一本のビードの肉盛溶接を行った。

板厚 5mm の平板(50×50mm)に研削加工を施し、熱処理として焼入れ焼戻した HRC48 相当のものを供試材とした。また、溶加材には供材の $\phi 0.3\text{mm}$ ワイヤ (テクノコート株) を用いた。

レーザー溶接をしたものは溶接部中心から溶接部境界にかけて引張の残留応力が発生していることから、応力緩和を目的に後熱処理を実施し、溶接部の評価を行った。

レーザーを電流値 120A、パルス幅 6ms、周波数 5Hz、出力 12W で供試材に照射し、ビードオンプレートにて溶接を行った。レンズの焦点距離は 84mm であるため、溶接は供試材表面にジャストフォーカスで行った。

レーザービーム形状は円形で、送り速度を一定とし、溶加材および供試材に対して一方向に 40mm の長さまでレーザーを照射し、肉盛溶接を行った。溶接後は表 2 の各条件にて熱処理を行い、溶接部を評価した。電気炉の条件は、SKD61 の焼戻し温度である 550°C を基本条件として検討を行った。従来通りの電気炉による熱処理だけでなく、熱処理工程を増やさず簡易的熱処理を行う方法としてレーザー溶接機を使用しレーザー照射による応力緩和方法を新規技術として熱処理条件に加えた。照射条件においてはアンダーカットなどの欠陥防止や後工程での加工に影響がないよう表面形状に変化を発生させない出力にてレーザー照射による空打ちを行うこととした。電流値 80A 以上では表面形状が変化したことから、今回は 80A 以下をレーザー照射条件とした。

表 2 熱処理条件

電気炉	500°C1h 保持後、空冷
	550°C1h 保持後、空冷
	575°C1h 保持後、空冷
	600°C1h 保持後、空冷
レーザー照射 (肉盛部にレーザーを照射)	50A6ms5Hz(1.02W)
	60A6ms5Hz(1.09W)
	80A6ms5Hz(2.02W)

2-2-2 多層盛溶接部評価

実際の金型使用を想定し、実際の使用環境に近い多層盛における溶接部の評価と後熱処理の影響を硬さ・残留応力・シャルピー衝撃試験にて測定評価した。

焼入れ焼戻しを施した板厚 5mm の平板(25×50mm)に溶損部分を想定し、平面に深さ 0.5mm 幅 17.5mm の溝を施した試験片に 3 層盛(各層平均: 26 パス)にて肉盛溶接を行った。溶加材には供材の $\phi 0.5\text{mm}$ のワイヤ (テクノコート株) を用いた。図 2 に試験片概要を示す。

斜線部肉盛溶接部

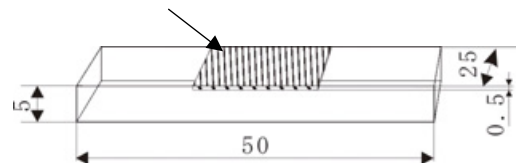


図 2 多層盛試験片概要

レーザーの加工条件を 160A8ms5Hz(61W)で $\phi 0.5\text{mm}$ の供材に照射し肉盛を行った。溝幅が大きいため $\phi 0.5\text{mm}$ のワイヤを使用したが、この場合でも残留応力が同様に発生することを確認し、今回は $\phi 0.3\text{mm}$ に対して太いワイヤを用いることとした。

電気炉における熱処理条件は応力緩和が確認された一本ビードの結果より 550°C30min 保持とした。レーザー照射条件は、より出力の大きな 140A15ms5Hz(85W) の条件でスポット径をジャストフォーカス $\phi 0.9\text{mm}$ に対し、 $\phi 1.6\text{mm}$ とデフォーカスさせ肉盛溶接部に対してレーザー照射した。

3. 実験結果と考察

3-1 後熱処理条件の検討

溶接部の評価では、ビード部分を切断後、マクロ組織、ミクロ組織観察を行い、硬さならびに残留応力測定を行った。

硬さ測定は、ビッカース硬さ試験機にて行った。

図 3 に各種後熱処理条件における残留応力の結果を示

す。溶接線に対して直交方向で残留応力を測定した。レーザ溶接のままの非熱処理材で内部引張応力が境界部で最大で 368MPa 生じているのに対し、電気炉における熱処理では、500℃で内部引張応力が 310MPa と若干の低下に留まっている。しかし、通常の焼戻し温度である 550℃においては応力が大きく緩和し、境界部においては 98MPa まで低下していることが分かった。また、熱処理温度 550℃以上では応力緩和に大幅な変化は見られなかった。レーザ照射においては、小出力の 40A・60A では境界付近での引張残留応力が緩和され、全体に応力が分散されたが、なお 265MPa 引張残留応力があり効果が小さい。しかし、溶接部においては 80A で-2MPa と応力が大幅に緩和されていることが分かった。レーザ照射条件の出力を増加させる程、残留引張応力が低下する傾向にあることが分かった。また、レーザ溶接の条件 12W に対して後熱処理としてのレーザ照射条件 2W と出力が 1/6 以上において効果が現れることが分かった。

よびレーザ照射は 245MPa と共に引張残留応力が低下した。特に、レーザ照射した試験片に関しては、溶接部において-120MPa と圧縮残留応力が付与された。全体に圧縮残留応力が付与可能であれば、より溶接部の割れやクラックを防ぐことが期待できる。

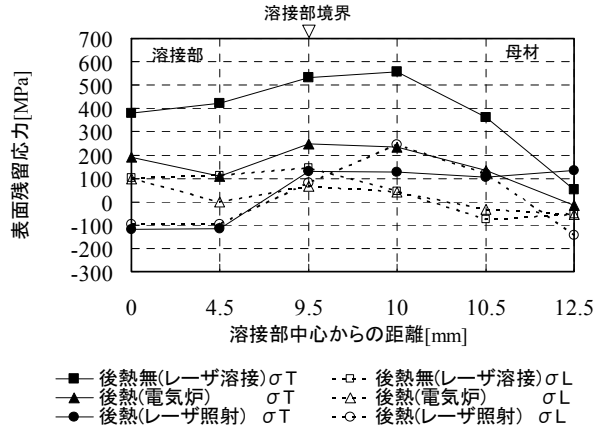


図4 多層盛における表面残留応力測定結果

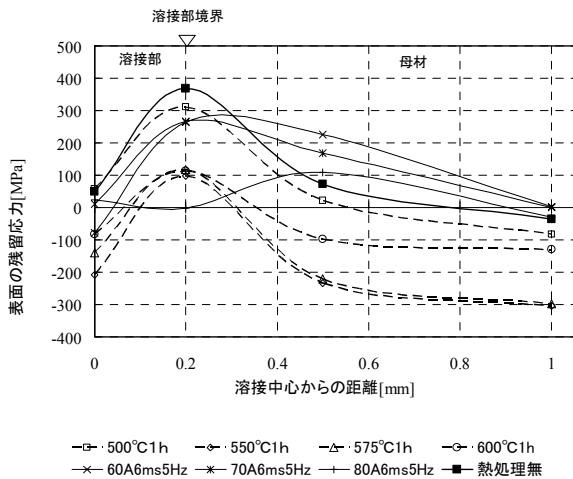


図3 後熱処理後の表面残留応力

3-2 多層盛溶接部評価

多層盛における溶接部の評価と後熱処理の影響を硬さ・残留応力・シャルピー衝撃試験にて測定評価した。

図4に多層盛における残留応力の測定結果を示す。 σ_T を溶接線に対して直交方向、 σ_L を溶接線に対して並行方向として応力を測定した。一本ビードの結果においては溶接部から 0.3mm 程度で残留応力が大幅に低下しているのに対し、多層盛では溶接部境界から 0.5mm の地点で 557MPa の内部引張応力を示し、1mm の地点においても 362MPa と高い値を示した。レーザの入熱量が多層盛によって高くなったため、熱影響部が広がっていると考えられる。また、多層盛においてもレーザ溶接のままの未処理材に対して、後熱処理を行った試験片では電気炉は 0.5mm の地点で 233MPa お

図5にビッカース硬さ測定結果を示す。レーザ溶接では溶接部表面から 695HV と最高の値になるとともに、余盛部以下では溶接部内においては 630HV から 590HV とパス間においての組織の差からばらつきが発生していた。レーザ照射による後熱処理では、表面から 0.3mm 程度まで 739HV と硬さが増加した。0.3mm 以下の深さではレーザ溶接の硬さと変化がないことから、レーザ照射によって表面のみが再溶融し不均一なマルテンサイト組織が安定した組織に変化したため、硬さが高くなったと考える。また、デフォーカスしたことにより再溶融しても硬さの増加が 0.3mm に留まっており、レーザのエネルギーが表面付近のみしか入熱されなかったと考えられる。電気炉の場合は 726HV から 677HV とレーザ溶接のみの場合と同様ばらつきが見られ、硬さも増加していた。

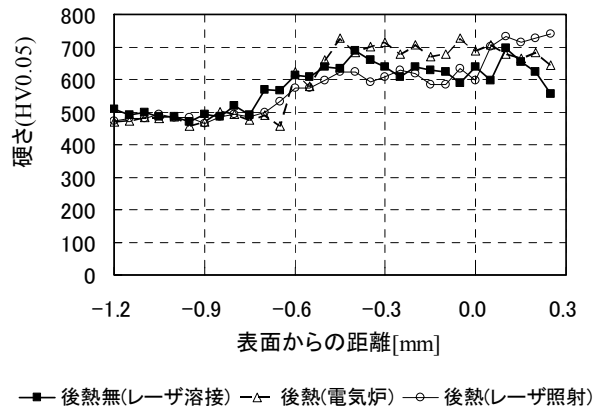


図5 ビッカース硬さ試験

図6に深さ方向での各条件における残留応力を示す。深さ方向の測定には、電解研磨により表面を20 μm ずつ研磨し、表面の残留応力を測定した。

この結果、硬さ試験と同様溶接部のパス・層間による値のばらつきが発生していた。レーザー溶接の場合、表面付近の応力が378MPaに対して深さ0.28mmで928MPaと引張残留応力が急激に増加した。後熱処理のレーザー照射においても表面以外はレーザー溶接と同様な結果を示していた。レーザー照射については表面付近の圧縮応力は表面から0.2mm付近でレーザー溶接と同等の454MPaと高い値に増加した。レーザー溶接部の深層部になるにつれ、内部引張応力が高くなる傾向にあることが分かった。

電気炉においても表面144MPaから深さ0.04mmで234MPaと増加したが、レーザー溶接の未処理材と比較しても大きな応力差は見られず、また、応力はレーザー溶接のみの未処理材に対して残留応力は大幅に低下しており、熱処理の影響が内部まで入っていることが分かる。

また、溶接の層間において引張残留応力が增大することが分かった。レーザー照射による簡易の後熱処理を考えた場合、この層間による内部引張応力の増大を避けるため、各層を溶接した時点でレーザー照射にて後熱

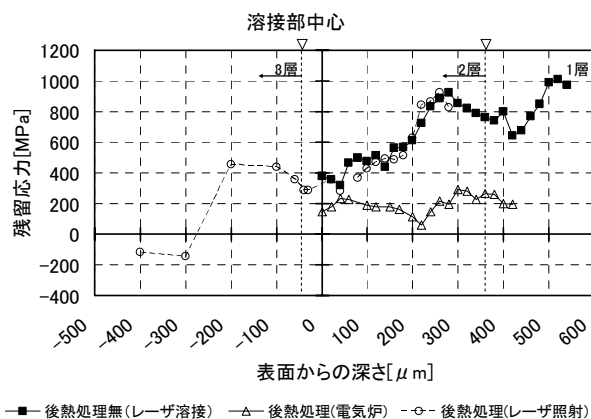


図6 深さ方向の残留応力(溶接部中心)

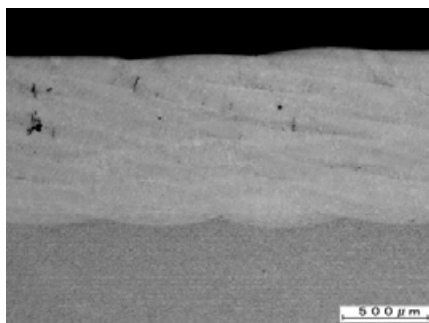


図7 溶接部断面写真

処理を行う必要があると考える。図7に溶接部断面写真を示す。

シャルピー衝撃試験においては、JIS Z 2242に規定されるUノッチを施したサブサイズ試験片を使用した。幅17.5mm深さ0.5mmの溝を彫り肉盛溶接した。図8にその試験結果を示す。溶接をしていない母材のみの場合平均31J/mm²であり、後熱処理の無いレーザー溶接は、27J/mm²と靱性が低下した。また、後熱処理を施したものは、それぞれ電気炉は平均31J/mm²、レーザー照射は平均28J/mm²となった。

電気炉は母材とほぼ同程度の値を示しており後熱処理による効果が現れた。レーザー照射の場合はレーザー溶接と殆ど変化が無く、後熱処理による効果は見られなかった。レーザー照射の場合、表面付近は圧縮残留応力になっていたものの0.2mmで既に後熱処理無しレーザー溶接と同等の値となっており、後熱処理が表面付近で留まっていたため靱性が低下したと考えられる。今後、後熱処理のレーザー照射条件において、層間毎にレーザー照射を施した場合やパルス幅を長くし入熱を増やす等、現在の圧縮残留応力からより深く熱が入る条件を検討する必要がある。

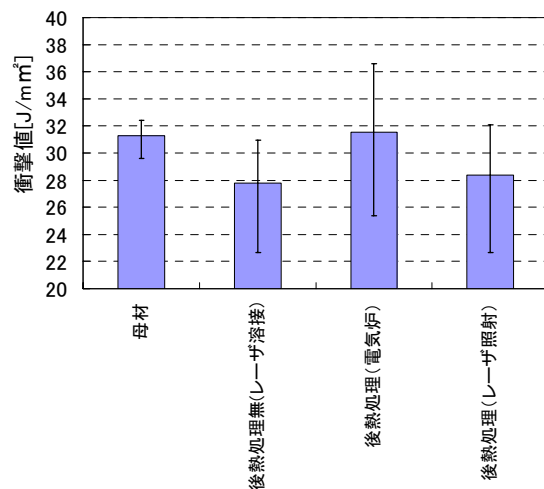


図8 シャルピー衝撃試験

4. 結 言

レーザー溶接での後熱処理の影響についての検討及びレーザースポット径を変化させデフォーカスし入熱を広範囲に分散させた溶接部の評価を行った結果、以下の結論を得た。

- (1) レーザー溶接への後熱処理の有効性が確認できた。
- (2) 電気炉においては、未処理材で引張残留応力557MPaに対して233MPa、レーザー照射においては245MPaと引張残留応力の低下が確認できた。
- (3) レーザー照射による後熱処理の場合、表面のみの応力

緩和に留まっていた。今後、内部まで応力緩和が可能なように、後熱処理としてのレーザー照射条件や層間毎に後熱処理を行うなどの検討が必要と考える。

- (4) 硬さ試験においては、レーザー照射は表面付近の硬さが 739HV に増加し、内部ではレーザー溶接のみの未処理材と変わらなかった。
- (5) 衝撃値は、電気炉で熱処理したものは母材と同程度の衝撃値が得られた。

参考文献

- 1) 星野 昌子, 石田 正文, 勝又 信行, 斉藤 修
: 山梨県工業技術センター研究報告, No.24, p.47-50 (2010)
- 2) 大中 逸雄・荒木 孝雄: 溶融加工学, p.214-215 コロナ社 (1992)
- 3) 實石 博司: 電気加工学会誌, Vol.45, No.108, 20-22 (2011)