

肉盛溶接による金型補修に関する研究(第3報)

星野 昌子・勝又 信行・石田 正文・佐野 正明・八代 浩二

Research of Repairing Die with Overlaying(3rd report)

Shoko HOSHINO, Nobuyuki KATSUMATA, Masafumi ISHIDA, Masaaki SANNO, Koji YATSUSHIRO

要 約

金型溶接補修技術の最適化を図り、安定した金型補修技術の確立を目的に、YAG レーザ溶接機にて肉盛溶接した溶接部の熱疲労特性を確認した。5cyc 程度でレーザ溶接部に溶接金属の脱落やクラックが発生したが、レーザ溶接後に窒化処理を施したものはクラックの進展が少なく 100cyc 程度まで良好な表面状態であった。レーザ溶接後に後熱処理を施した方が、熱疲労特性に優位であることが分かった。

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り、ますます重要視されている。これらの製造プロセスにおいて、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、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、金型の肉盛手段に溶接変形が少なく高速深溶込みが期待できるレーザ溶接の適用技術の蓄積と、安定した金型の補修技術の確立を目的とする。前年度まではレーザ溶接の溶接状態の把握のため、1 パス溶接や多層盛での溶接部の残留応力、硬さおよび衝撃値の評価を行った。本年度はダイカスト金型への適用を想定し、熱疲労試験を実施し、レーザ溶接部の熱疲労特性について評価した。

2. 実験方法

本実験には、供試材は前報¹⁾と同様ダイカスト用金型や、プレス成形金型にも多く使用される合金工具鋼 SKD61(48HRC)を使用した。

2-1 試験片形状

熱疲労試験片の形状、寸法および溶接状況を図 1 に示す。

研削加工で仕上げられた試験片表面に、それぞれ角穴

(5mm×5mm×1mm)を切削加工にて作成した。

肉盛溶接は、熱量の差における溶接状態の違いを評価するため、試験片表面の角穴に対して、表 1 に示す 2 種類の条件にて、図 2 のように 3 層 1 方向で表面の研削加工方向に対してそれぞれ平行方向・直交方向に肉盛溶接を施した。溶接後に平面研削盤にて余盛部分を除去し熱疲労試験片とした。

通常ダイカスト金型では疲労強度を向上させるために窒化処理を実施している。そこで、レーザ溶接後に前報から検討している後熱処理を兼ねた窒化処理を施し、2 つのサンプルにて熱疲労試験を行った。表 2 に熱疲労試験片の状況を示す。

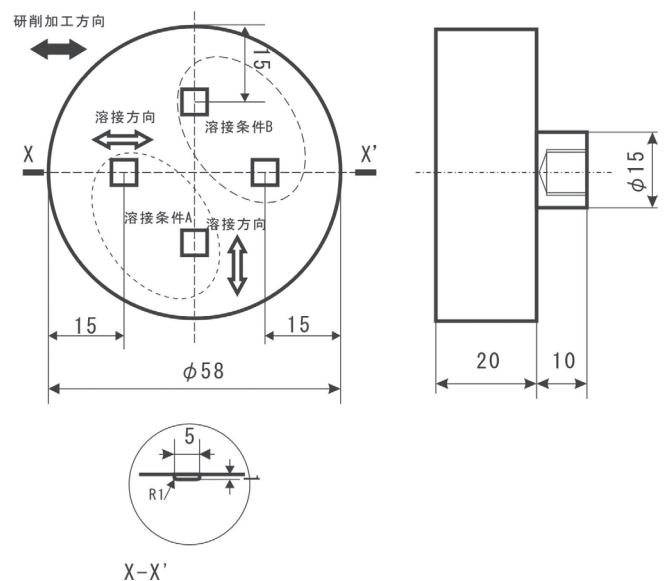


図 1 熱疲労試験片形状

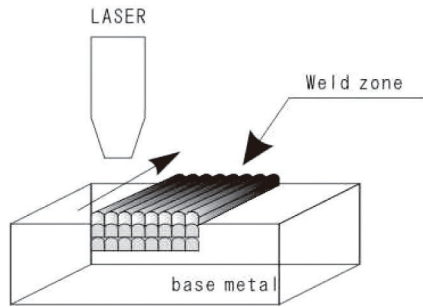


図2 レーザ溶接概念図

表1 熱疲労試験における溶接条件

溶接条件: A	電流;160A パルス幅;8ms パルス周波数;8Hz (LASER Power:81.6W)
溶接条件: B	電流;160A パルス幅;7.5ms パルス周波数;7.5Hz (LASER Power:66W)

表2 熱疲労試験における後熱処理条件

試験片	後熱処理条件
No.1	レーザー溶接のみ
No.2	レーザー溶接& 窒化処理(530℃6h)

2-2 評価方法

2-2-1 評価条件

レーザー溶接部の評価は、溶接部、母材部の残留応力測定および溶接部の表面観察を行った。残留応力測定および表面観察は、熱疲労試験前後および試験中に所定のサイクル(5, 10, 100, 500, 1000 サイクル)にて行った。

熱疲労試験は、ダイカスト金型を想定し、試験片を加熱ブロックに 160 秒間接触させて 570℃まで加熱し、その後、水中に浸漬して 100℃まで 10 秒間冷却し、これを 1000 サイクルまで繰り返した。1000 サイクル終了後、各溶接部を溶接線と直交方向に切断し、ビッカース硬さ分布測定を行った。

2-2-2 測定方法

残留応力測定には応力測定装置(株リガク, AutoMATE)を使用した。応力測定条件を表3に示す。応力の測定は、溶接部ビード幅が約 0.6mm であることから、微小領域での応力の発生を把握するため、まず、コリメータ

サイズを φ0.15mm, 0.1mm ピッチで測定した。

次に、同じ領域で φ1mm, 0.5mm ピッチで測定を行い、比較した。応力測定の方法は図3に示すように、各溶接線に対して直交方向に測定した。

表面状態の観察には、マイクロSCOPE (株式会社キーエンス, VH8000) を使用した。熱疲労試験後はビッカース硬さ試験にて溶接部の硬さ測定(押し込み荷重 100gf), 断面組織の観察を行った。

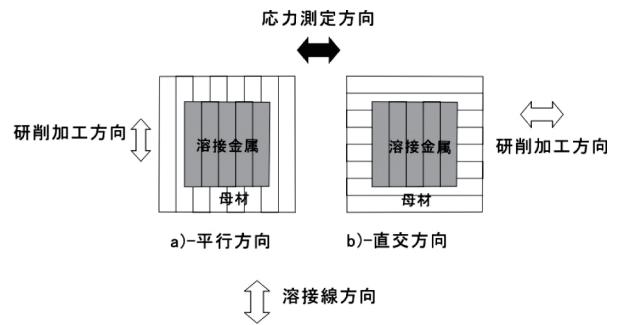


図3 X線応力測定方向

表3 応力測定条件

	測定条件
ターゲット・フィルタ	Cr-V
管電圧・管電流	40kV40mA
回折面	αFe211
応力定数	-297.50MPa
揺動	5度
コリメータサイズ	φ1mm, φ0.15mm

3. 結果および考察

3-1 レーザ溶接部の残留応力測定

実際の使用状況に近い多層盛にしたときの溶接状態における残留応力の形成状況を検討した。試験片は、溶接条件 A にて図3の b) に示すように多層盛にした。

実際の金型では溶接を施した状態で使用することはまれであり、通常余盛分を切削加工または研削加工にて除去し所定の形状に成形する。そこで、余盛除去の研削前後における溶接部の応力状態について検討した。また、測定の効率化を目的に φ1mm のコリメータを用いてコリメータサイズが応力分布に及ぼす影響を検討した。これらの結果を図4に示す。なお、応力の測定方向は全て溶接線に対して直交方向である。

コリメータサイズを φ0.15mm で測定すると、溶接部全体に引張応力が発生しており、特に溶接部と母材部境界付近では 1040MPa と引張応力が大きく発生している

箇所が現れた。レーザ溶接による急速加熱，急速冷却と母材からの拘束により，引張応力が大きくなったと考えられる。これに対し，余盛除去の研削後には，加工応力が支配的となり全域で-750MPa程度の圧縮応力となった。また，研削後にも境界部付近では応力が-500MPaと溶接部中心付近に比べ高くなる点が存在することが分かった。

一方，コリメータサイズが $\phi 1\text{mm}$ では，応力値が平均化され $\phi 0.15\text{mm}$ で測定された明瞭な溶接部の境界はなくなっているが，うねりが反映されていることが分かる。また， $\phi 0.15\text{mm}$ に比べ測定時間も 10%以下と短縮され，以降では $\phi 1\text{mm}$ で測定した。

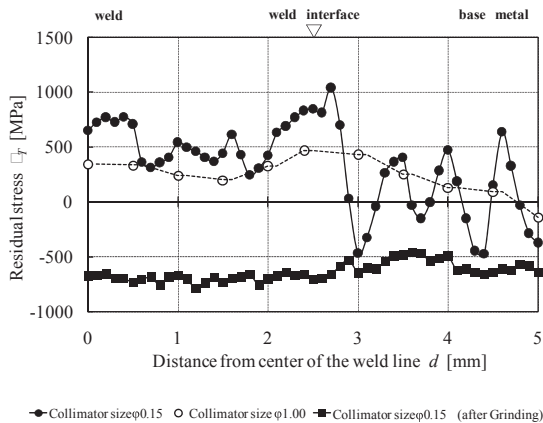


図4 多層盛における残留応力分布

3-2 加工における応力の影響

試験片表面の溶接方向に対し，平行・直交方向に研削加工を行った際の残留応力を評価した結果を図5に示す。応力測定には $\phi 1\text{mm}$ のコリメータを用い，図3に示す方向でそれぞれ測定を行った。

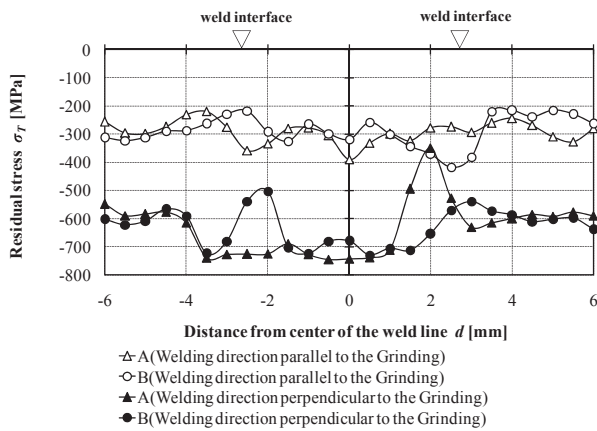


図5 加工方向における残留応力分布

研削加工を施すと溶接方向と直交する方向では-600MPa程度まで圧縮応力が形成されることから研削加工による影響が非常に大きいことが確認された。母

材が圧縮残留応力 -600MPa に対し，溶接部は-800MPaとなり母材に対して大きく発生することが確認された。また，今回の溶接条件の違いによる残留応力に差は見られなかった。

平面研削加工では加工変質層により表面付近の圧縮応力が発生することが知られており²⁾，その影響で溶接部も一定の圧縮応力になったものと考えられる。また，X線侵入深さは約 $10\mu\text{m}$ であり，溶接部の研削加工変質層以下の深さにおいては引張応力が存在すると考えられる。

一方，研削加工方向と溶接方向が直交している場合には境界部に圧縮応力が局所的に低下している部分が見られ，このような部分からひずみや割れが発生する可能性が考えられる。

研削加工方向と溶接方向が平行な場合は，溶接部が-300MPa程度で全体に推移しており，母材部と溶接部での圧縮応力の値に差は少なかった。

このように研削方向による残留応力の異方性が確認できた。

3-3 熱疲労試験過程における表面観察

熱疲労試験過程の試験片表面観察結果を図6に示す。

両試験片共に，0サイクルでは研削加工面であるが，5サイクルで試験片表面にクラックが確認された。No.1においては溶接止端部等に溶接部の脱落が確認できた。

	No.1(As welded)	No.2(Nitriding)
0cycle		
5cycle		
100cycle		
1000cycle		

図6 熱疲労試験過程における表面状態

No.2 の窒化処理に関しては、溶接線沿いにクラックが発生するだけに止まっていた。

サイクルが増加するとともに、クラックが双方のサンプルも増加しているが、1000 サイクル終了時点で、窒化処理を施した No.2 のサンプルは、クラックが少なく抑制効果があることが確認できた。

3-4 熱疲労試験過程における残留応力の変化

レーザ溶接のままの状態、および溶接後に窒化処理をした試験片の熱疲労試験過程における溶接線直交方向の残留応力 σ_T の推移を、図7と図8に各々示す。

溶接線平行方向の場合と直交方向で応力を比較した場合、溶接境界部において著しく直交方向の応力が増大し、パスにおける影響も明瞭であった。

レーザ溶接のままの状態で試験を行った試験片は、当初、測定領域全体において平面研削加工の影響で圧縮応力が残っていた。試験片の母材部の応力は、-300MPa 程度のまま試験終了時まで推移した。

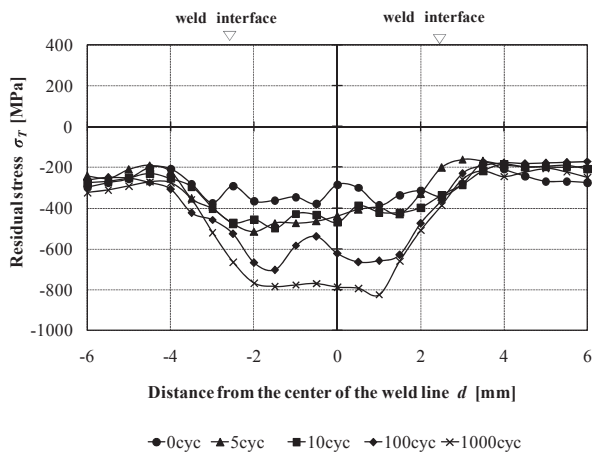


図7 熱疲労試験過程における残留応力(No.1)

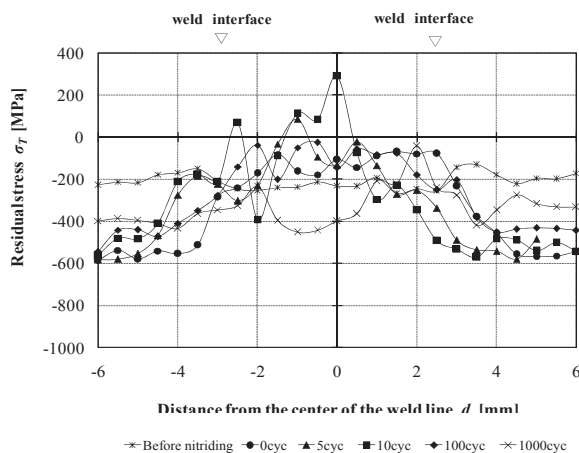


図8 熱疲労試験過程における残留応力(No.2)

それに対し、レーザ溶接部は熱疲労試験のサイクル数が増加するごとに圧縮応力が増加した。

熱疲労試験の加熱温度は 570°C であるのに対し、SKD61 の 2 次硬化温度は 480~520°C 付近である³⁾。溶接部内において Mo や V 炭化物が徐々に析出して圧縮応力が増大したと考えられる。

窒化処理を施した試験片の母材部は、窒化処理により、-300MPa から -600MPa へ圧縮応力が増加した。また、熱疲労試験過程での加熱の影響で窒素の表層から内部への拡散ならびに表面からの逃散により、圧縮応力は徐々に低下した。

溶接部では、窒化処理によって母材部より 100~300MPa 低い圧縮応力が形成されていた。窒化処理における加熱温度は 530°C であり、研削加工による加工変質層は転位が蓄積され、再結晶が起きやすい状態である。よって、研削加工の加工変質層に形成した圧縮応力が窒化処理時の加熱により解放され、内部に蓄積していた溶接時の応力が現出したものと考えられる。

試験サイクル数の増加に伴い、溶接部では、一時的に圧縮応力が減少し引張応力に変化した。1000 サイクル終了時では、-400MPa と圧縮応力に変化した。サイクル数が増加するごとに 2 次硬化とクラックの進展による酸化物が生成することで、圧縮応力が増加したと考えられる。

3-5 熱疲労試験後の硬さ分布

1000 サイクルの熱疲労試験終了後に溶接線と直角方向に試験片を切断し、試験片表面から 1.5mm までの深さ方向のピッカース硬さ分布を測定した結果を図9に示す。

溶接のままの状態の試験片は、溶接部が HV640 まで硬化しており、SKD61 の焼入れ最高硬さに近い値であった。SKD61 は焼入れ性の高い金型鋼のため、空冷で焼きが入ること、および熱疲労試験時の加熱による 2 次硬化により溶接部の硬さが増加したためと考えられる。

また、窒化処理した試験片の母材部では、窒化処理により表面近傍が HV700 程度まで硬化し、内部では HV460~480 程度であることが分かった。溶接部内では、硬さにバラつきがあり特に溶接部下部の 0.5~1mm 付近では一部で HV1000 程度まで硬さの増加が見られた。溶接施工時に形成していた微細なクラック内を窒素が移動したこと、ビードの重ね合わせ部に存在する酸化物の影響などが考えられるが、詳細は不明である。

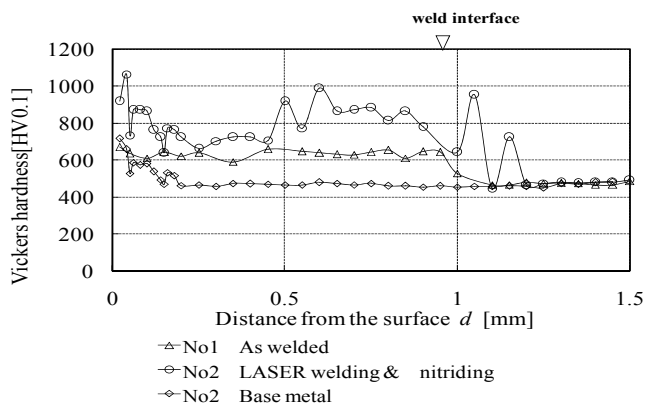


図9 熱疲労試験後における硬さ断面

4. 結 言

ダイカスト金型を想定した熱疲労試験を実施し、レーザ溶接部の熱疲労特性について評価した。

レーザ溶接の溶接状態の把握のため1パス溶接、多層肉盛での応力測定や硬さ試験を行い、溶接部の熱疲労特性について検討を行った。本研究で得られた結果を以下に示す。

- (1) 多層肉盛試験片を コリメータサイズ $\phi 0.15\text{mm}$ で測定すると、レーザの局所過熱と冷却、母材からの拘束により 1040MPa の引張応力が存在した。余盛除去の研削後には、加工応力が支配的となり、 -750MPa 程度の圧縮応力となった。
- (2) 研削加工方向と溶接方向が直角方向の場合、 600MPa 程度の圧縮応力、研削加工方向と溶接方向が平行の場合 300MPa 程度の圧縮応力となり、残留応力に異方性があった。
- (3) 後熱処理を施すことで応力の低下に効果があり、溶接後のデフォーカスによるレーザ照射においても応力が緩和した。
- (4) 熱疲労試験では5サイクル程度で溶接部の脱落や溶接線に沿ってクラックが進展した。また、レーザ溶接のみの場合に比べ、窒化処理を施した場合はクラックの進展が少なく窒化処理の効果が確認できた。
- (5) 熱疲労試験のサイクル数が増加するごとに、レーザ溶接のままの状態で使用した場合、溶接部では、圧縮応力が増加する傾向にあった。窒化処理をした場合、溶接部は一時的に圧縮応力が減少し、引張応力に変化するが、1000サイクル終了時では圧縮応力になった。
- (6) 溶接部は硬さが2次硬化により $\text{HV}640$ 程度まで増加し、熱影響部で急激に硬さが減少した。

参考文献

- 1) 星野 昌子, 他: 肉盛溶接による金型補修に関する研究(第二報), 山梨県工業技術センター研究報告, No. 26, p. 45-49 (2010)
- 2) 研削工学: 精密工学会編, オーム社 p. 69-82 (1987),
- 3) 實石 博司: 電気加工学会誌, 45(108), p. 20-22 (2011).
- 4) 山陽特殊製鋼技報: vol. 7(2000), p. 65-71