

ダイカスト金型鋼の寿命評価に関する研究

—放電加工したSKD61金型鋼の熱疲労特性—

日原政彦・八代浩二

Evaluations of Life for Die Casting Die Steels
—Characteristics of Thermal Fatigue of SKD61 Die Surface after EDM—

Masahiko HIHARA and Koji YATSUSHIRO

要 約

形彫り放電加工およびワイヤ放電加工後に形成される表面には加工変質層が存在し、ダイカスト金型鋼の品質や精度に著しい影響を及ぼす原因となる。形彫り放電加工後の熱疲労挙動について、熱疲労試験機により実験を行い、X線残留応力およびクラックの観察により評価した。形彫りおよびワイヤ放電加工後の表面に存在した引張応力は熱疲労試験過程における加熱—冷却の繰返し熱サイクル数の増加に伴い低下した。また、熱疲労試験後の残留応力曲線は研磨深さの増加に伴い圧縮応力の存在が認められた。試験後の金型鋼断面におけるクラック発生数の測定ではパルス幅 τ_m の増加に伴い減少した。

1. 諸 言

ダイカスト金型および熱間鍛造金型等の製作において、形彫りおよびワイヤ放電加工法は生産性の向上、工程の短縮化および短納期化等の達成にとって重要な加工手段になっている。

しかし、放電加工後の金型表面には変質層（溶融再凝固層）および残留応力等の加工欠陥や不均一な領域が存在し、金型の品質安定性を著しく阻害する要因となっている。

ダイカスト金型等の場合、放電加工後の変質層は通常、研磨により除去しているが、完全に除去することは作業性の低下や操業経費の削減等から難しいことが多い。特に、加工形状の複雑な金型の深穴部およびスリット部等のコーナは変質層の一部が残存し、操業過程においてこの領域から欠陥を誘発し、金型寿命の低下を促進する原因となっている¹⁾²⁾。

近年、放電加工後の表面の品質向上を目的として、ショットピーニングによる圧縮応力の負荷³⁾⁴⁾、電解磨き⁵⁾および表面処理⁶⁾等が適用され、これらにおける有用性が報告されている。しかし、放電加工面に加熱—冷却の繰返し熱サイクルを負荷した場合の熱疲労特性を系統的に検討した報告は少なく、ダイカスト金型等の品質安定性を図る上で加工面の熱疲労挙動に関する検討は重要な研究

課題となっている。

そこで、本研究においては各種の放電加工条件で形彫りおよびワイヤ放電加工を行った熱間工具用金型鋼（SKD61、以下、金型鋼と言う）を用い、放電加工面の熱疲労挙動について残留応力、残留オーステナイト、クラック発生数等の測定およびクラック近傍の観察等から、金型鋼の表面品質安定性に及ぼす放電加工面の影響について検討したので得られた結果を報告する。

2. 実験方法

2-1 素 材

本実験に用いた素材は表1に示す組成をもった金型鋼（SKD61）であり、棒状素材から直径58、厚さ20および23mmの形状に機械加工した後、焼入れ（1030℃、1h、ガス冷却）—焼戻し処理（560℃、6h—600℃、6h、空冷の2段処理）を行い、表面硬さをHRC45としたものである。

表1 金型鋼（SKD61）の化学成分

(重量%)

成 分	C	Si	Mn	Cr	Mo	V
SKD61	0.38	1.0	0.4	5.0	1.5	1.0

2-2 放電加工条件および加工方法

形彫りおよびワイヤ放電加工は表2に示す各々の加工条件で行った。形彫り放電加工機はDIAX, DE-90TF, DM-250Nを用い、試験片の試験面(直径58mm)と同一寸法の銅電極を対向させ放電加工を行い、表面を0.2mm(加工時間, 6, 10min)除去した。なお, 加工は放電電流ピーク値12.4A, パルス幅20, 250 μ sと変化させ, 他の条件は同一とした。

また, ワイヤ放電加工機はDIAX, DWC-80を用い, 試験片の試験面から3mmの位置を切断した。加工条件はコンデンサ容量および充電電流ピーク値を各々変化させ, 他は同一条件とした。

表2 放電加工条件

形彫り放電加工		ワイヤ放電加工	
電極	銅	加工液比抵抗	$4 \times 10^4 \Omega \text{ cm}$
極性	逆極性	コンデンサ容量(C)	0.2, 0.5, 1.5 μ F
加工液	灯油	充電電流ピーク値(I _c)	5.0, 11.2, 20.0A
放電電流ピーク値(I _p)	12.4A	デューティファクタ(d \cdot f)	65%
パルス幅(τ_{on})	20, 250 μ s	ワイヤ走行速度	1.7m/min
デューティファクタ(d \cdot f)	50%	ワイヤ張力	840gf
加工時間	6, 10min	テーブル送り速度	0.4mm/min
加工形式	繰返し放電	加工液・液圧(上)	2200mmHg (20.6MPa)
		" (下)	2250mmHg (23.5MPa)

2-3 熱疲労試験

形彫りおよびワイヤ放電加工面は, 熱疲労試験機により加熱-冷却の繰返し熱サイクルを負荷した。熱疲労試験は加熱ブロック(550~570 $^{\circ}$ C)に試験片を150~165s接触・加熱, 保持後, 急冷(100~110 $^{\circ}$ C, 5~7s)する熱サイクルを所定の試験サイクルまで行う方法である⁷⁾。

各放電加工面および熱疲労試験後の表面は, X線応力測定法⁸⁾により残留応力を測定し, 残留オーステナイト量は, X線回折により認められた全回折積分強度に対する全 γ Fe回折積分強度の比から求めた⁹⁾。

また, 深さ方向の残留応力および残留オーステナイト量は, 表面を電解研磨法(氷酢酸:過塩素酸=4:1)により段階的に除去しそのつど測定した。なお, 電解研磨による表面除去が残留応力値に及ぼす影響は本実験の場合, 1~2.5kgf/mm²

(100~300 μ m除去の場合)と小さく, 測定値に著しい影響を及ぼさないことを確認している¹⁰⁾。

また, クラック発生数の測定は所定回数の熱疲労試験終了後, 試験片を中心から切断し, 端面から15mmの位置を中心として10mmの範囲の断面に存在するクラック深さを各々測定してクラック分布を求めた。なお, 最大クラック深さはクラック測定範囲内に存在した最大のクラックとした。

3. 実験結果及び考察

3-1 形彫り放電加工の残留応力

図1は本熱疲労試験に用いた試験片の形彫り放電加工面における研磨深さと残留応力との関係を示す。表面残留応力値はパルス幅20 μ sの場合50kgf/mm², 250 μ sの場合, 38kgf/mm²となり, 表面の応力は放電エネルギーの増加に伴い低下する傾向を示した。また, 応力が影響している領域(応力作用域深さ)は反対に放電エネルギーの増加に伴い増加(約2倍)した。

なお, パルス幅250 μ sにおける応力分布曲線は研磨深さが約20 μ m程度の領域に応力の不連続部分が認められたが, 顕微鏡観察において, この領域は溶融再凝固層と熱影響部との境界近傍に対応し, 硬さ測定においても分布曲線が低下する領域¹¹⁾であることから, 加工エネルギーが大きい場合, 生地(軟化(熱影響))が応力の低下として認められたものと考えられる。

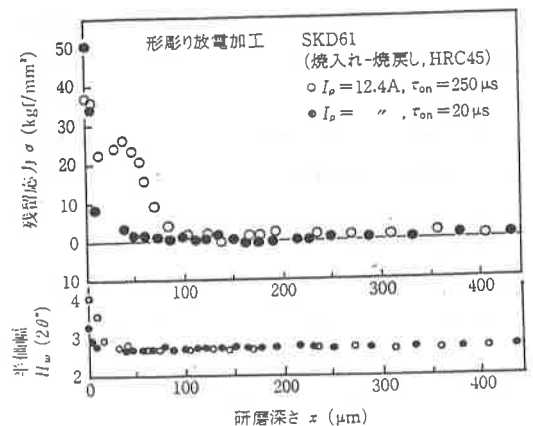


図1 形彫り放電加工後の研磨深さと残留応力との関係

図2はこれらの試験片に、7970サイクルの熱疲労試験を行った時の残留応力測定結果を示す。パルス幅20 μ sの場合、最表面応力値は低下するが、応力分布曲線は表面の引張応力とその直下に圧縮応力が存在する形態を示した。

一方、パルス幅250 μ sの場合、最表面応力値は試験前と比較して明確な変化は認められない。

このことは、放電エネルギーの低下により形成される変質層厚さが薄く、不均一な状態となるために、熱疲労試験過程での加熱により変質層内および生地との境界近傍のひずみが解放された結果と考えられる。

なお、圧縮応力の存在は、パルス幅20 μ sの場合と同様であるが、圧縮応力値は放電エネルギーの増加(変質層厚さの増加)により増加する傾向を示した。

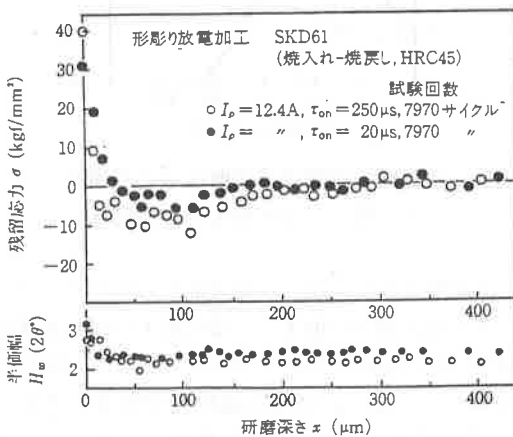


図2 熱疲労試験後の形彫り放電加工面からの研磨深さと残留応力との関係

これら圧縮応力の存在は、熱疲労試験過程において放電加工面に重畳される加熱時の圧縮応力と、冷却時の引張応力との熱応力の発生が変質層内に存在する引張応力と釣合を保つため、ならびに、残留オーステナイトの応力誘起マルテンサイト変態による変態応力との相互作用による影響から発生するものと考えられる^{(2),(3)}

また、半価幅の測定では表面から徐々に半価幅値が減少する傾向となり、ひずみの発生は表面近傍が著しいことを示した。なお、半価幅および残留応力の結果は共によく一致した。

3-2 ワイヤ放電加工の残留応力

図3は熱疲労試験前の各ワイヤ放電加工条件に及ぼす研磨深さと残留応力との関係を示す。ワイヤ放電加工表面の残留応力は加工エネルギーの増加に伴い引張応力が増加する傾向を示した。

また、この時の半価幅はコンデンサ容量1.5 μ F、充電電流ピーク値20Aの加工条件では他の条件に比べ増加し、放電加工後に発生する結晶ひずみは大きいことが明らかとなり、応力作用域深さは放電エネルギーの増加に伴い増すことが認められた。

なお、前述と同様な条件で加工した表面は変質層が明確に認められ、変質層深さと残留応力測定時の応力作用域深さとはよく一致した結果が得られた。

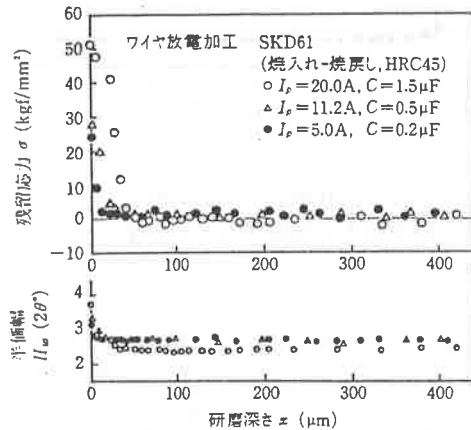


図3 ワイヤ放電加工後の研磨深さと残留応力との関係

図4(a)および(b)はコンデンサ容量0.5および1.5 μ F、充電電流ピーク値11.2および20Aの各条件で加工した試験片に前者は3542および10801サイクル、後者は10581および19291サイクルの各熱疲労試験を行った後の残留応力と研磨深さの関係を示す。

コンデンサ容量0.5 μ F、充電電流ピーク値11.2Aの場合、最表面残留応力は熱疲労試験サイクル数の増加に伴い低下するが、その直下に圧縮応力が存在する分布形態となる。この圧縮応力は図2で得られた形彫り放電加工の場合と同様な傾向である。

コンデンサ容量1.5 μ F、充電電流ピーク値20A

の場合、最表面の引張応力は熱疲労試験後においても残存しているが、試験前の値 (50kgf/mm^2) に比べ、各試験サイクルとともに 10kgf/mm^2 と著しく低下した。また、各試験サイクル後の応力作用域深さは試験前に比べ共に増加するが、図4(a)と比較して放電エネルギーの増加により著しく増加する傾向を示した。

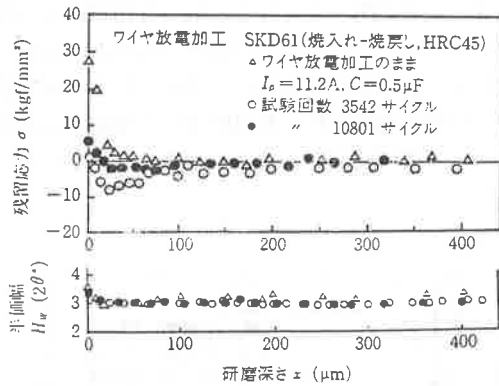


図4(a) 熱疲労試験後のワイヤ放電加工面からの研磨深さと残留応力との関係

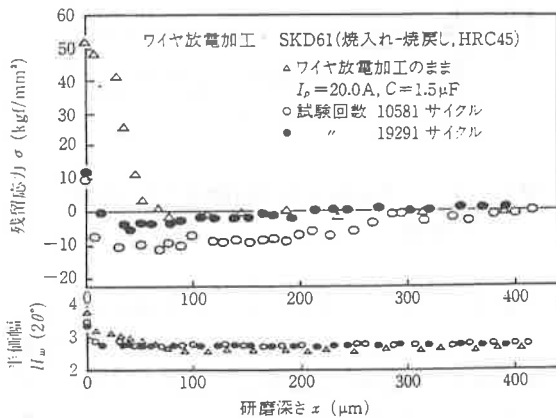


図4(b) 熱疲労試験後のワイヤ放電加工面からの研磨深さと残留応力との関係

なお、半幅分布曲線は形彫り放電加工の場合と同様、放電加工後に比べ低下する。このことは測定領域に存在する結晶ひずみが、熱疲労試験過程でクラックの発生および加熱による軟化等の影響から開放された結果と考えられる。

3-3 残留オーステナイトの変化

図5はコンデンサ容量 $0.2\mu\text{F}$ 、充電電流ピーク値 5.0A の条件でワイヤ放電加工した試験片に、熱疲労試験を3538、7335および10873サイクル行った時の研磨深さとオーステナイト量との関係を残留応力分布曲線と共に示した。

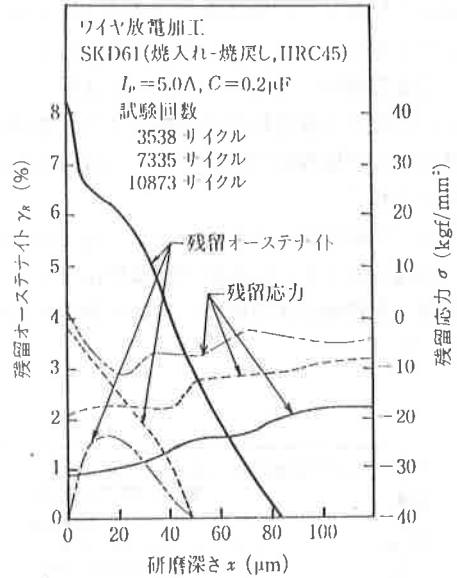


図5 各熱疲労試験後の研磨深さと残留オーステナイト量および残留応力との関係

3538サイクルの場合、最表面から残留オーステナイト量は徐々に低下し、残留応力の収れんする領域 (約 $80\mu\text{m}$) 近傍でゼロとなる。この傾向は7335サイクルにおいても同様な挙動を示すが、10873サイクルでは最表面の残留オーステナイト量は非常に少なく、その後、研磨深さの増加に伴い増加し、約 $40\mu\text{m}$ 近傍で消失する分布形態となった。

ワイヤ放電加工後の表面層は残留オーステナイトの増加、ワイヤからのCu元素のFe中への固溶および電解作用による脱炭などが影響し、硬さの低下および軟化が著しい^{14), 15)}。

そのために、加工後のX線による回折線から求めた残留オーステナイト量は、形彫り放電加工に比べ増加している。よって、熱疲労試験後においては表面の加熱による残留オーステナイトの再分解、酸化物の形成および生地の軟化と熱応力の繰返しによる残量オーステナイトの応力誘起マルテンサイト変態が、試験サイクルの増加により促進

され、表面近傍の残留オーステナイト量が低下するものと考えられる。

一方、試験サイクル数の少ない場合は未変態の残留オーステナイトが多く、表面近傍は酸化物、マルテンサイトおよびオーステナイト等の不均一な組織となり、熱疲労試験過程での熱応力の発生が複雑になる結果、残留応力分布曲線が不連続となり、応力の収れんする領域が増加するものと考えられる。

なお、残留オーステナイト量の消失深さと残留応力の安定域とは良い対応を示すが、これは、残留オーステナイトの熱応力による応力誘起マルテンサイト変態に伴う挙動が残留応力に大きな影響を及ぼしているためと考えられる¹⁶⁾。

これらのことから、通常の金型に放電加工変質層が残存した場合、操業過程で残留オーステナイトのマルテンサイト変態に伴う、圧縮応力の発生が金型の変形を引き起こし、熱疲労試験時のような熱応力との相互作用により、金型の破壊を誘発させる原因になることが本結果から明らかとなる。

3-5 クラック分布

図6は形彫り放電加工条件を放電電流ピーク値12.4A、パルス幅20および250 μ sの2種類の条件で加工した後、熱疲労試験を3200および12250サイクル行った後の断面のクラック分布および最大クラック深さの測定結果を示す。

パルス幅20および250 μ sの場合のクラック分布は共に40 μ m程度のクラックの存在が多いが、試験サイクル数が3200サイクルの場合は、12250サ

イクルに比べ、トータルのクラック発生数は増加する傾向を示した。また、最大クラック深さを各放電加工条件で比較すると、パルス幅20 μ sおよび250 μ sの場合は共に、試験サイクル数の増加に伴い生地深くまで成長した大きなクラックが認められた。

なお、同じ試験サイクル数ではパルス幅20 μ sの場合が250 μ sに比較して最大クラック深さは増加した。このことは、加工条件により変質層(浸炭層¹⁷⁾)の形成厚さ・形態が異なり、変質層が薄く不均一部が多い低エネルギー加工条件の場合、不均一部に熱応力が集中し、クラックの発生を促進させるため、最大クラック深さが増加するものと考えられる。

なお、金型鋼における10000サイクルの熱疲労試験後の最大クラック深さは200~350 μ m程度であり、形彫り放電加工後の試験結果(パルス幅20 μ s, 12250サイクル)と比べ明確な変化が認められず、変質層内に存在する引張応力を熱処理などで改善¹⁸⁾することにより、放電加工層は耐熱疲労特性を向上させる層になる可能性が考えられる。

図7はコンデンサ容量1.5 μ F、充電電流ピーク値20Aの条件でワイヤ放電加工後、熱疲労試験を10581と19291サイクル行った後のクラック分布を示す。

試験サイクル数が10581サイクルの場合は19291サイクルに比べ、クラック分布のクラック発生数および最大クラック深さが共に増加する傾向となる。

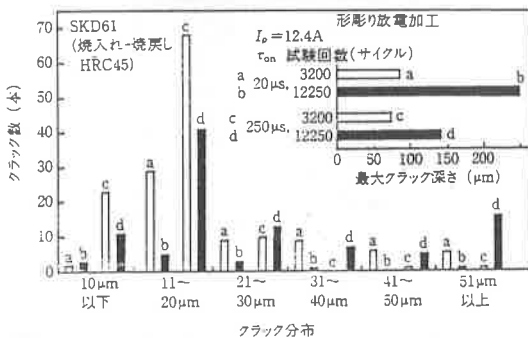


図6 形彫り放電加工面の熱疲労試験後のクラック分布と最大クラック深さ

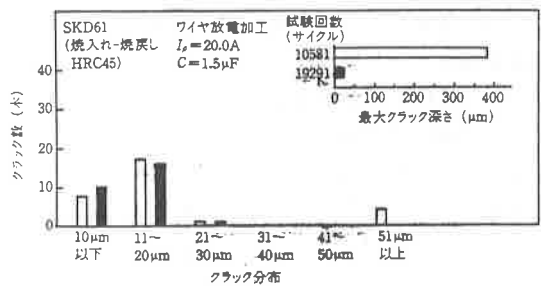


図7 ワイヤ放電加工面の熱疲労試験後のクラック分布と最大クラック深さ

ワイヤ放電加工の場合、試験サイクル数の増加は放電加工面（脱炭層¹⁹⁾）の表面酸化を促進させ、変質層領域の酸化物の形成と脱落の繰返しがクラック深さに影響を及ぼしているものと考えられる。

また、金型鋼の耐熱疲労特性は生地硬さや焼戻しマルテンサイト組織の健全性により大きく左右され、焼きなまし材の場合、ヒートチェックおよびクラックは試験初期に発生し、クラック深さも深くなることが認められている²⁰⁾。

このことから、ワイヤ放電加工において、表面に形成した変質層は、形彫り放電加工時に認められる浸炭層に比べ耐熱疲労特性が低下するものと考えられる。この傾向は両者の最大クラック深さの測定結果ともよく一致する。

3-6 断面観察

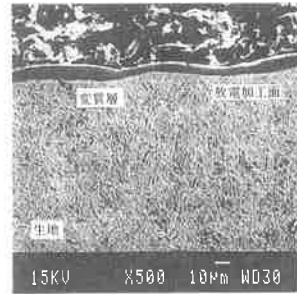
図8(a), (b), (c)および(d)は、形彫りおよびワイヤ放電加工後および熱疲労試験後の断面観察写真(SEM, 顕微鏡)である。

(a)は形彫り放電加工の場合を示すが、表面に放電加工により形成した不均一な変質層の存在が認められる。(b)は熱疲労試験12250サイクル後の結果である。変質層領域内にクラックの存在が多く、一部のクラックは生地中の深い領域まで成長している。

また、クラックの開口は変質層直下が著しく、熱サイクルの重畳による圧縮応力および引張応力の繰返しが変質層内のクラックに集中し、その部分から生地中へクラックの進展を促進させる結果と考えられる。

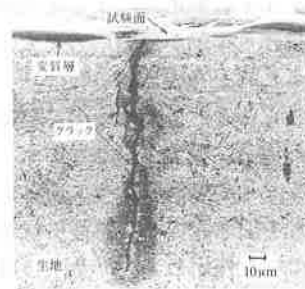
(c)はワイヤ放電加工後の断面を示すが、加工変質層とその直下に電解腐食による空孔の存在が明らかとなる。この試験片に熱疲労試験を約10581サイクル行った後の断面観察を(d)に示す。表面の変質層は酸化物の形成が著しく、微細なクラックは表面酸化により脱落し、一部のクラックは生地中に深く進展する形態を示した。

なお、熱疲労試験サイクル数を増加させると、最大クラック深さは10581サイクルよりも19291サイクルが小さい傾向となった。これらの挙動は今後検討しなければならないが、断面観察からも、サイクル数の増加に伴い表面酸化に伴う酸化物層の形成・脱落の繰返しがクラック深さの値に著しく影響を及ぼしていると考えられる。

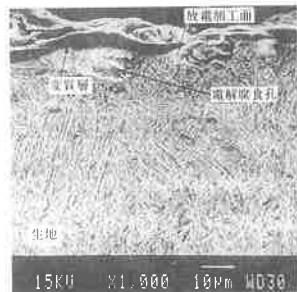


(a)形彫り放電加工後 (SEM)

$I_p = 12.4A, \tau_{on} = 20\mu s$

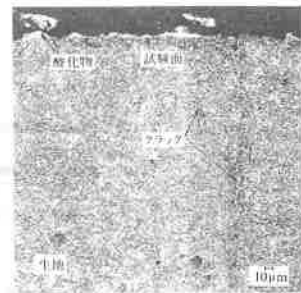


(b)熱疲労試験後 (12250サイクル, SEM)



(c)ワイヤ放電加工後 (SEM)

$I_p = 20.0A, C = 1.5\mu F$



(d)熱疲労試験後 (10581サイクル, 金相)

図8 形彫りおよびワイヤ放電加工後および熱疲労試験後の断面観察

(a)(b): 形彫り放電加工, (c)(d): ワイヤ放電加工

4. 結 言

形彫りおよびワイヤ放電加工面の熱疲労特性について検討を行ったが、得られた結果を要約すると下記のことが明らかとなった。

- 1) 形彫り放電加工後の表面近傍には引張残留応力が存在し、表面応力値は放電エネルギーの増加に伴い低下するが、応力作用域深さは反対に増加する傾向を示した。
- 2) ワイヤ放電加工後の表面の引張残留応力および応力作用域深さは、共に放電エネルギーの増加に伴い増加した。
- 3) 放電加工後、熱疲労試験を行った試験片の表面残留応力は、試験サイクル数の増加に伴い低下し、応力作用域深さは増加する傾向を示した。応力作用域深さの増加は変質層内に存在する引張残留応力と、熱疲労試験過程での熱応力との釣合いから発生したものであると考えられる。
- 4) ワイヤ放電加工後、熱疲労試験を行った試験片の残留オーステナイト変化は、残留応力変化とよい対応を示し、残留応力分布曲線の不連続部は残留オーステナイトの応力誘起マルテンサイト変態に起因した挙動であると推察される。
- 5) 熱疲労試験後の変質層近傍の観察において、形彫り放電加工の変質層は試験過程で分解されず残存することが明らかとなり、ワイヤ放電加工のそれは試験過程で分解し、酸化物の形成・脱落を繰返す形態を示した。

終わりに本論文をまとめるにあたり、東京大学生産技術研究所増沢隆久教授には、有益なご教示を頂きました。ここに厚く感謝申し上げます。

文 献

- 1) 日原政彦, 藤原和徳, 向山芳世, 緒方 勲: ダイカスト金型鋼に関する研究(第1報), 精密工学会誌, Vol.55, No.10 (1989) 1869.
- 2) 田所寛明, 菊池政男, 柏木 健, 大野博久: ヒートチェック発生に及ぼす放電加工条件の影響, 日本ダイカスト会議論文集, 10月(1990) JD90-03.
- 3) L.Eliasson and O.Sandberg: Effect of Different Parameters on Heat Checking Properties of Hot-Work Tool Steels, Proc. of the 2nd Int. Conference on Tooling, Germany, Sep., 1989) 3.
- 4) 増井清徳, 曾根 匠: 放電加工面性状と高品位化, 精密工学会誌, Vol.57, No.6 (1991) 945.
- 5) 鈴木 清, 浅野修司, 山田浩司, 本橋正喜, 高松洋, 青木 勇, 植松哲太郎: 板ばね状砥石によるみがき加工の研究, 精密工学会春季学術講演論文集, 3月(1990) 641.
- 6) 日原政彦: 窒化処理したダイカスト金型鋼の熱疲労挙動, 型技術, Vol.6, No.8 (1991) 170.
- 7) 向山芳世, 日原政彦: 熱疲労に基因する放電加工面品質に関する研究(第1報), 電気加工学会誌, Vol.24, No.48 (1991) 24.
- 8) X線応力測定標準: 日本材料学会, 材料強度部門委員会編(1977)
- 9) 7)に同じ
- 10) 緒方 勲: 放電加工における加工面残留応力と変質に関する研究, 東京大学学位論文(1990) 39.
- 11) 日原政彦, 向山芳世, 緒方 勲: 形彫り放電加工面のX線残留応力測定, 日本材料学会, 第24回X線材料強度に関するシンポジウム講演論文集, 7月(1987) 8.
- 12) 佐藤忠雄, 相沢 力: プレス型材料と熱処理, 日刊工業新聞社, 東京(1972) 29.
- 13) 日原政彦, 向山芳世: ダイカスト金型鋼に関する研究(第8報)—金型鋼の汎用有限要素による熱応力解析—精密工学会秋季学術講演論文集, 9月(1991) 257.
- 14) 斉田義幸, 内藤 寛, 川尻敏二: 冷間ダイカスト鋼の放電加工変質層の組織と残留応力, 電気加工技術, Vol.6, No.17 (1983) 13.
- 15) 増井清徳, 曾根 匠: ワイヤ放電加工面の電解腐食, 精密工学会誌, Vol.54, No.6 (1988) 1168.
- 16) 原田敬之: 工具鋼と残留オーステナイト, 金属材料, Vol.15, No.3 (1975) 39.
- 17) 14)に同じ
- 18) 日原政彦, 向山芳世: 放電加工した熱間金型鋼の残留応力, J.Advanced Science, Vol.2, No.2 (1990) 73.
- 19) 15)に同じ
- 20) A.Schindler, A.Kulmberg and J.H.Stuhl: Thermal Fatigue of H-13 in Die Casting Applications, SDCE congress, June (1977) GT77-065.