

生産用金型の高度化・高精度化技術の開発 (第3報)*

— 熱間金型用合金工具鋼(SKD61)の放電加工改質層の熱疲労挙動 —

日原 政彦・萩原 茂・八代 浩二・佐野 正明

Development of High Quality and High Accuracy Technologies of Various Dies(3 rd report)

— Thermal Fatigue Characteristics and Applications of Multiple Surface Processes to SKD61 Die Steels —

Masahiko HIHARA, Shigeru HAGIHARA, Koji YATUSHIRO and Masaaki SANO

要 約

熱間金型用合金工具鋼 (SKD61) における加工にとって放電加工変質層の存在は製品品質や金型の寿命に関し問題が多く、加工面の安定性維持のためにはピーニング処理、窒化処理やレーザ加工などの複合加工や表面処理が必要となる。これらの複合加工後の試験材について熱疲労特性を各種の試験により評価した。放電加工面にガス窒化処理およびピーニング処理した試験材の熱疲労特性は無処理のそれに比較し改善された。

Abstract

The purpose of this study is to stabilize and prolong the die life of die casting die by application of multiple surface processes, such as peening, nitriding and laser irradiation after electric discharge machining. Thermal fatigue characteristics of the die steels treated by the processes were studied by means of thermal fatigue test and X-ray residual stress analysis. The die steels after electric discharge machining followed by gas nitriding and peening showed higher resistance to thermal fatigue than non treated die steels.

1. 緒 言

ダイカスト金型の品質低下および寿命低下は金型鋼の熱疲労特性、加工方法および金型における操業時の諸要因等が相互に影響を及ぼしあい発生することが多く、ダイカスト製品の品質安定性、生産性の向上および経費の削減等の達成には操業過程におけるダイカスト金型の品質を如何に維持させるかについて考慮しなければならない。

ダイカスト金型には主として、熱間金型用合金工具鋼 (SKD61) が用いられているが、溶湯温度の高温化、鑄造条件の過酷化 (高温化、高圧力化、長時間化等) や表面性状の高品質化等、厳しい産業界からの諸要求を満たすために各種の鋼種が開発されてきている^{1), 2)}。

しかし、如何に高機能性を付与された高品質な鋼種を用いても、ダイカスト金型は機械加工、放電加工、磨き加工および溶接補修等の工程を経て、熱処理および表面処理に

より安定化され、3次元の複雑形状を持った金型と言う「工具」になる。

そこで、金型の加工過程で付加される各種の欠陥 (ツールマーク、加工欠陥) および残留応力等の発生について、発生要因の解析や十分な改善策を立てなければ、金型の品質を長期間の操業過程において維持させることが難しい状況となってきた。

3次元複雑形状を持ったダイカスト金型や熱間鍛造金型の製作にとって、放電加工法 (形彫り、ワイヤ放電加工) は加工機の機能性向上、表面あらさおよび変質層の改善等、加工面の高品質化が達成され多くの企業で利用されている。

しかし、仕上げ放電加工後の表面に形成した改質層においても、引張応力の残存が認められ、加熱-冷却の熱サイクルが繰り返し負荷されるダイカスト金型等では、操業過程において品質安定性が阻害される。

金型の品質安定化や寿命向上対策の一手法として仕上げ放電加工した金型表面に窒化処理を行うと、熱疲労特性の改善が得られた事例も報告^{3), 4)}されているが、窒化処理に

*本報告書は平成5年度から平成7年度までの3カ年で行った「国庫、技術開発研究費補助事業、広域共同研究」により得られた研究成果の一部である。

においても過酷な鑄造条件（スクイズキャスト，薄肉高速充填等）や高温溶湯の使用（高Si系）の場合には窒化物の分解に伴う熱疲労特性の低下，クラックの早期発生・進展および溶損性の低下等に起因して，すべての金型に対し必ずしも有効な処理になっていない。

よって近年，金型の加工面および表面処理面における品質安定性やその改善方法が強く求められ，熱間金型用合金工具鋼（SKD61）の熱疲労特性，溶損特性および焼き付き性等に対する検討は製鋼メーカ，表面処理メーカ，鑄造企業等多くの関連業界において重要な研究課題となっている。

本研究では放電加工した金型表面の安定化と後加工面の改善を目的として，金型鋼にガス窒化処理した試験材および仕上げ放電加工後，ピーニング処理，ガス窒化処理，レーザ加工等の各種の表面加工を単一および複合的に行った各試験材について，ダイカスト金型への効果的な適用と放電加工表面の改質を図るため，熱疲労特性に及ぼす加工面の影響について，残留応力の測定から検討したので報告する。

2. 試験方法

2.1 素材

実験に用いた素材は熱間金型用合金工具鋼（SKD61）であり，所定の形状に機械加工を行い，焼入れ-焼戻し処理により，表面硬さを48HRCとした。実験手順および各種の表面加工条件の概要を図1に示す。

仕上げ放電加工は板状試験片表面および熱疲労試験片の試験面に各々行った。なお，放電加工条件は仕上げ領域における3種類の表面あらしを設定し，加工を行った。

ピーニング加工（処理）は仕上げ放電加工面（変質層）の改善および改質を目的に行った。なお，ピーニング加工を単独で金型鋼表面に行うと，ピーニングによる圧縮応力の発生と表面近傍における組織の微細化により，熱疲労特

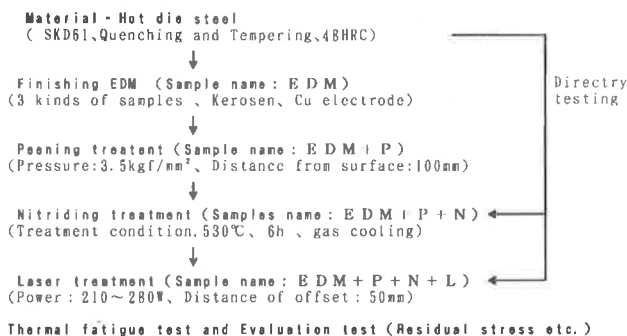


Fig. 1 Flow chart of sample preparations.

性の向上が得られた報告^{5), 6)}もあるが，繰り返しの熱サイクルが負荷される金型等による現象やメカニズムについてはあまり明確にされていない。

ガス窒化処理は各々に加工した試験材をガス窒化処理装置内において，反応促進剤とNH₃ガスとの混合雰囲気中で530°C，6時間保持して行った⁷⁾。また，レーザ加工はガス窒化処理面に最適なレーザ照射条件を選択し，表面あらしの異なる3種類の試験材表面に行った。

2.2 評価試験

各試験片の熱疲労特性試験は図2に示す装置により，加熱（570°C，160秒保持）-冷却（100°C，15秒保持）の繰り返し熱サイクルを段階的に加工面に負荷させて行った。なお，熱疲労試験および焼き付き試験後の各試験片は各サイクル毎の表面の残留応力を測定した。また，目的の試験サイクル数終了後，これらの試験片は切断し，表面からのクラック進展状況，残留応力および変質層近傍の組織・組成変化等について，X線残留応力測定法およびSEM観察等から熱疲労挙動の解析を行った。

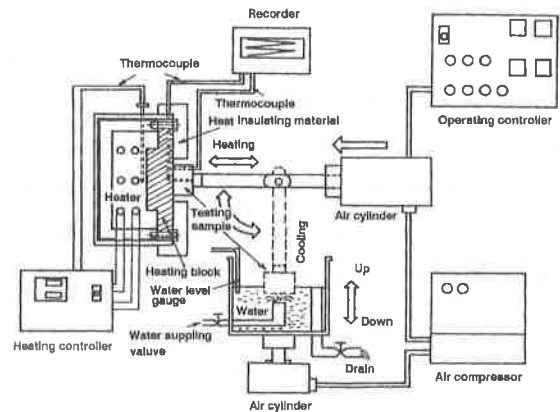


Fig. 2 Schematic view of thermal fatigue apparatus.

3. 実験結果および考察

3.1 表面あらしの変化

各試験材における熱疲労試験前の表面あらしの変化を表1に示す。放電加工後の表面あらしを測定すると，放電エネルギーの低い条件で加工した（7.4および12.0μmRmax）試験材はピーニング加工により約1/2~1/3に低下し，その後の窒化処理では変化しない。しかし，レーザ加工では僅かながらあらしが低下する傾向を示した。なお，前加工し

Table 1 Changes in surface roughness for various samples.

Samples	Roughness values μmRmax		
Finishing EDM (EDM)	7.4	12.0	23.3
Peening treatment (EDM+P)	3.4	4.3	21.7
Nitriding treatment (EDM+P+N)	4.5	4.6	24.0
Laser treatment (EDM+P+N+L)	3.2	3.6	17.7

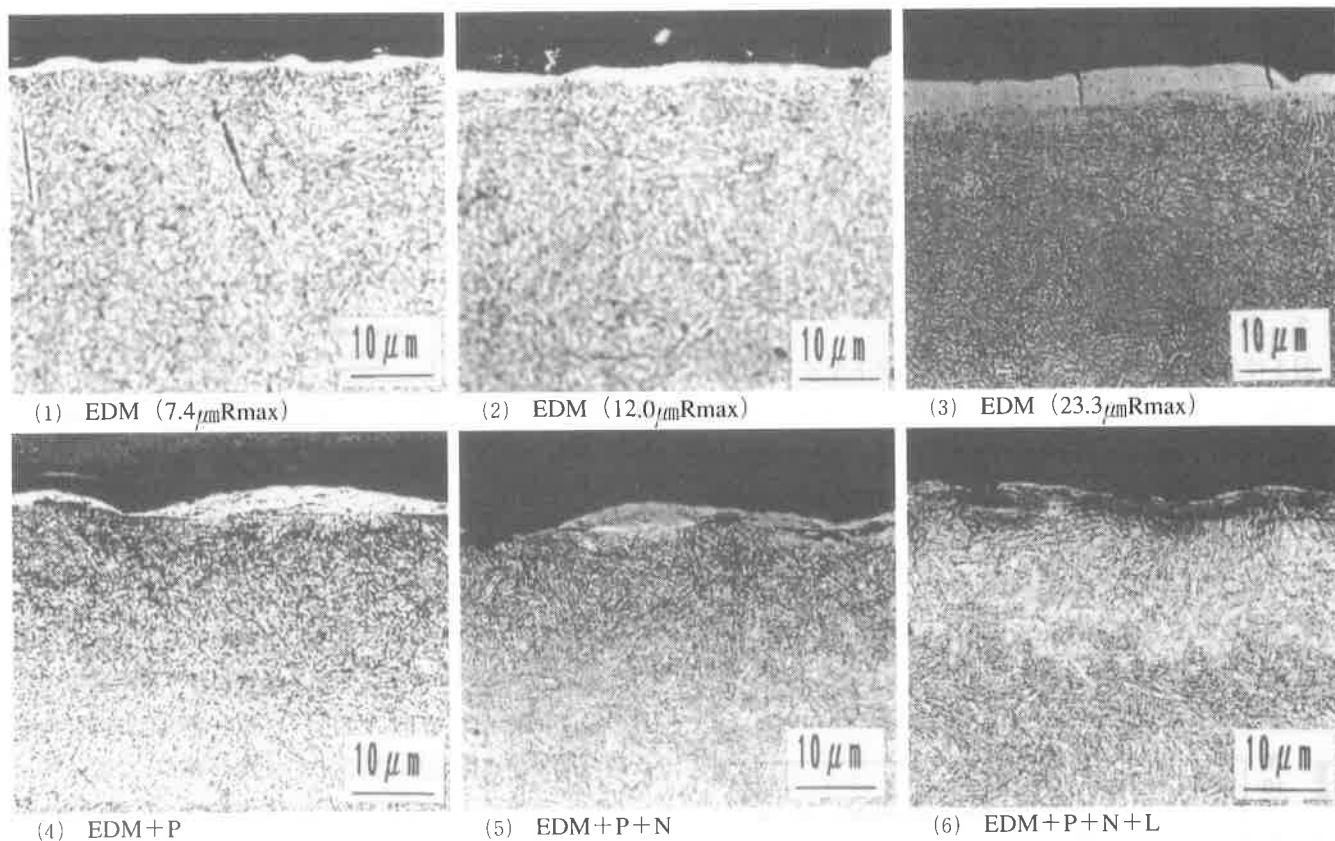


Fig. 3 Microphotographic observations of sectional area of various samples before testing. (No. 4, 5 and 6 showed surface roughness, 23.3 μm Rmax)

た金型鋼のレーザ加工は表面をレーザの入熱エネルギーにより溶融させない条件で加工したが、表面あらかさは3種類の放電加工条件において低下し、表面あらかさ23.3 μm Rmaxの場合低下が著しかった。

3. 2 組織観察

図3は仕上げ放電加工と放電加工後(表面あらかさ23.3 μm Rmax)の表面に複合加工した時の断面写真を各々示す。

仕上げ放電加工面においても加工変質層の存在が認められ、放電エネルギーの増加に伴い表面あらかさや変質層形成厚さが明確に増加し、不均一層の形成およびクラック等の加工欠陥が認められた。

放電加工面にピーニング加工(処理)を行うと、放電加工時に形成した鋭利な変質層部分は砥粒の衝撃力により僅かながら除去され、表面あらかさの低下に伴う変質層厚さの低下が認められた。

さらに、その試験材表面にガス窒化処理を行った場合(図4a)および窒化処理を金型鋼に処理した場合(図4b, c)のX線回折図形からも明確なように、放電加工時、灯油の熱分解により形成した炭化物(Fe₃CあるいはMe₃C)と窒化処理時に形成した窒化物(Fe₂₋₃N)との混在した化合物と考えられる白層の存在が認められた。なお、その直下には窒素の拡散に伴う拡散層が僅かに認められたが、前加工を行わない金型鋼に同様なガス窒化処理をした場合に

得られた結果と比べ拡散層深さは低下した。また、ガス窒化処理し窒化物の形成した試験材の室温と大気中で620℃まで加熱した時の回折線の変化を比較した結果が(図4b, c)である。室温では窒化物(Fe₂₋₃N)の回折線が明確に認められ、αFe回折線はブロードニングが著しく窒化物の回折線と混在して認められた。

これらの試験材を高温に加熱保持し、回折線の結晶構造を解析すると、620℃では窒化物の消失および固溶窒素に起因したαFe回折線によるピークシフトの変化は認められず、シャープなαFeピークと弱い酸化物の回折線の存在が明らかとなった⁸⁾。

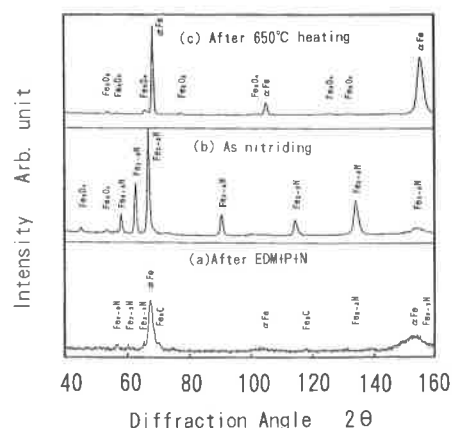


Fig. 4 X-ray diffraction profiles of EDMed and nitrated surfaces.

また、放電加工ーピーニング加工ーガス窒化処理後の表面にレーザ加工を行った場合、レーザ照射熱により影響を受けた窒化処理層領域は組成および組織変化が起り、腐食のされづらい微細な組織を呈した。

また、CO₂レーザを複合加工面に行うと、クラック等の欠陥の一部が消失したことから、レーザトリミング方法は金型鋼表面の改質が可能になることが明らかとなった。

3.3 残留応力測定

図5は金型に広く用いられている、タフトライド処理を金型鋼に行い、その表面にレーザ加工（エネルギー密度、0.28KJ/cm²）を行った時の研磨深さと残留応力との関係を示す⁹⁾。タフトライド処理後の表面からの残留応力分布形態はガス窒化処理した金型鋼の応力分布形態（図8）と傾向が良く一致し、表面近傍では圧縮応力が存在し、研磨量の増加に従い応力値は低下し、約120μm近傍でゼロとなった。

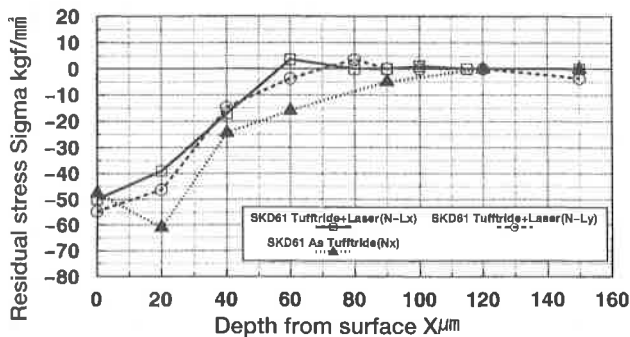


Fig. 5 Changes in residual stress distribution curves for treated by laser irradiation on tufftriding sample.

この試験材にレーザ加工を行った後の表面残留応力値には明確な違いはないが、硬化層深さは窒化処理のままに比較し浅くなった。

また、窒化処理表面にレーザエネルギーを付与させた場合、応力の測定方向の違い（レーザ走査方向に平行(N-Lx)と直角(N-Ly)に変化させた場合）に及ぼす残留応力値への影響は明確に認められなかった。

図6はタフトライド処理後の表面にレーザ照射を行い、照射エネルギーの違いに及ぼす残留応力分布の影響について検討した結果を示す。

エネルギー密度0.6KJ/cm²で照射した場合、表面は約80kgf/mm²の引張残留応力が認められ、非常に深い領域までその引張応力は残留し、400μm程度の除去においても消失しなかった。

一方、0.28KJ/cm²の場合、表面近傍に圧縮応力が発生し、作用域深さも非常に浅いことが明らかとなった。

これらレーザ照射による表面応力の発生形態の違いは、

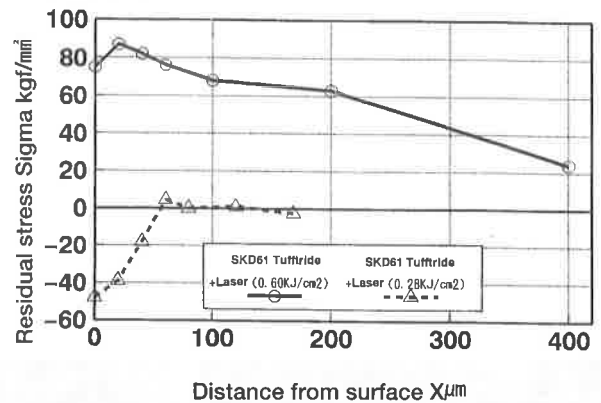


Fig. 6 Residual stress distribution curves treated by laser irradiations after nitrided.

レーザ照射エネルギーの母材への入熱量の違いによる熱応力と表面加熱時のマルテンサイト変態に伴う変態応力の重畳の程度が加工条件により異なり、照射部の冷却時の拘束状態の違いが残留応力の変化として現れることになる。

なお、引張応力の発生は金型の靱性を著しく低下させ、クラックの早期発生を誘発させる原因になる。よって、熱加工による表面の加工は金型の寿命に著しい影響を及ぼすために加工には注意が必要と考えられる。

図7は23.3μmRmaxの仕上げ放電加工後およびその後の各表面加工時に発生した残留応力の変化を示す。

3種類の仕上げ放電加工試験材における表面残留応力は共に引張応力が認められ、加工条件の違いによる応力値の変化は少なかった。

その後、ピーニング加工を行うと、放電加工時に認められた引張残留応力は完全に消失し、圧縮応力に変化した。なお、金型鋼に同様なガス窒化処理を行った場合の表面残留応力は-30~-40kgf/mm²程度であることから¹⁰⁾、圧縮

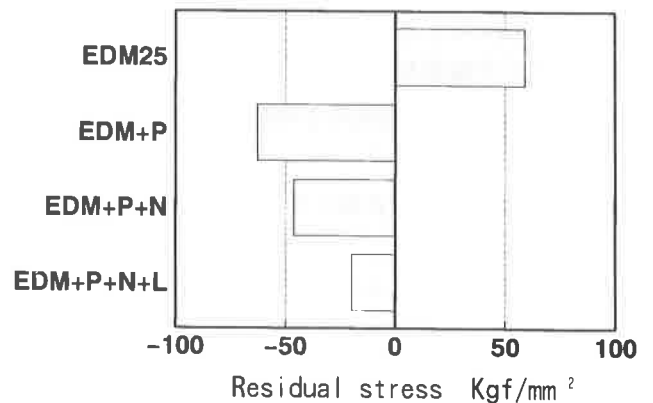


Fig. 7 Comparisons of residual stress after various surface modifications. (Surface roughness, 23.3 μmRmax)

応力の増加は前加工のピーニングにより重畳された圧縮応力の影響によるものと考えられる。

更にガス窒化処理を行うと、ピーニング加工時に認められた応力値に比較して僅かに圧縮応力が低下した。なお、レーザ照射を行うと圧縮応力が低下する傾向を示した。

ガス窒化処理した表面にレーザ照射を行うと、図6に示したタフトライド処理による結果と同様、レーザ加工条件により各加工後の表面には圧縮応力と引張応力との2形態の応力の発生が認められた。

よって、窒化処理表面に加工する場合、レーザ照射条件を十分に検討し、処理を行わなければ金型の表面品質低下を誘発させる可能性があるものと考えられる。

通常ガス窒化処理における試験前後の残留応力分布は図8に示すが、表面の応力は約-40~-60kgf/mm²の圧縮応力を示し、研磨深さの増加に伴い徐々に応力値は低下し、一定値に収れんする形態を示した。

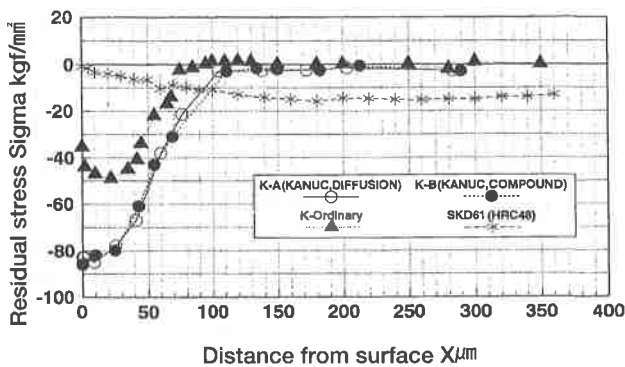


Fig. 8 Residual stress distribution curves for nitriding samples after thermal fatigue test.

しかし、15000サイクル後におけるガス窒化処理試験材の残留応力分布は長時間の加熱に伴う窒化物の分解やクラックの発生等に起因した応力の低下が認められたが、その直下の拡散層近傍の応力分布形態は試験前の応力勾配とよく一致し、本試験においては拡散層が残存していることがこの結果から明らかとなった。

金型鋼における熱疲労試験後の表面近傍はクラックの発生に伴う残留応力の解放から応力値がゼロとなるが、内部には僅かに圧縮応力が存在する形態を示した。

図9はSKD61金型鋼のガス窒化処理前後にピーニング加工を施したときの、熱疲労試験前後試験材の表面から深さ方向への残留応力分布を示す。

窒化処理前 (P+G) ピーニング加工を行った試験材の応力分布において、表面の残留応力値はガス窒化処理と同様な-80kgf/mm²を示したが、硬化層深さは約30µm程度浅くなった。また、窒化処理前後 (P+G+P) にピーニング加工を行った各試験材の熱疲労試験前後における表面から

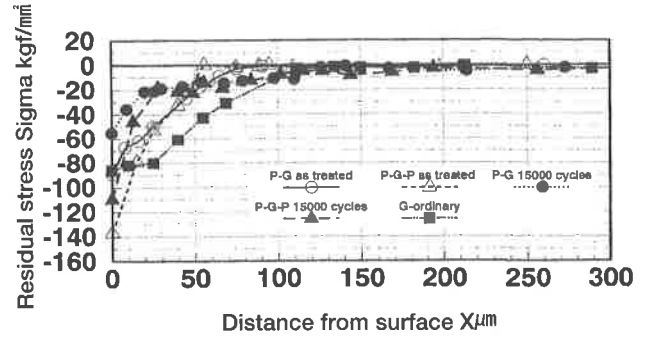


Fig. 9 Residual stress distribution curves of peening samples after and before nitriding.

の残留応力分布は (P+G+P) 試験材の場合が著しく大きな圧縮応力を示し、応力勾配がガス窒化処理に比べ大きく、硬化層深さも浅くなった。

(P+G+P) 試験材の表面残留応力の増加は窒化処理後のピーニング加工による影響が大きく、-140kgf/mm²程度の残留応力の発生は金型鋼における圧縮変形時の塑性変形を誘発させるには十分な応力となるために、金型に適用する場合にはこの応力値の管理が必要となることを示唆している。

一般に金型鋼に各種の表面加工や表面処理を行った時の処理状態の評価は硬さ測定から行うことが多いが、試みとして、図10に示す金型鋼表面にピーニング加工後、ガス窒化処理 (P+G) およびガス窒化処理前後にピーニング加工 (P+G+P) を行った各試験材について、硬さ分布と残留応力分布とを比較した結果を示す。

最表面近傍の硬さはだれ等の問題から測定が難しいため、10µmからの値を示しているが、(P+G+P) 試験材の表面近傍の硬さは前加工の影響が測定値の違いとして明確に認められず、共に1000~1200HVの値を示した。その後の硬化層深さは加工方法により異なるが、徐々に硬さが低下する分布形態となった。

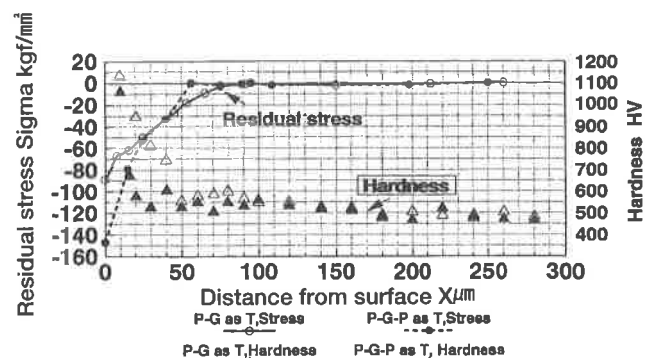


Fig.10 Comparisons of hardness and residual stress distribution curves after nitriding.

一方、残留応力分布の測定では最表面応力値の変化がガス窒化処理前後の加工状態により明確に異なる結果を示した。また、硬化層深さの形態も両者の試験材において異なった傾向を示した。しかし、硬化層深さは硬さ測定と残留応力測定とともによく一致した傾向を示し、硬さ測定で著しいバラツキが認められる試験材の評価には残留応力測定により評価できることが明らかとなった。

熱疲労試験前後の仕上げ放電加工のまま (EDM)、仕上げ放電加工後ピーニング加工 (EDM+P)、仕上げ放電加工後、ピーニング加工後、ガス窒化処理 (EDM+P+N) の各試験材における表面を電解研磨により除去しながら、そのつど表面の残留応力を測定したときの研磨深さと残留応力の関係を図11(a), (b)に示す。

表面加工後の残留応力分布形態は加工方法の違いにより異なり、(EDM) と (EDM+P) した試験材の応力作用域深さは共に40 μm 程度を示した。また、(EDM) の場合は約60~70 kgf/mm^2 の引張応力が発生し、その表面に (EDM+P) を行うと圧縮応力となり、両者の応力発生形態は異なった結果を示した。

(EDM) と (EDM+P) の場合の残留応力分布形態は引張応力と圧縮応力が対象的に認められ、(EDM+P+N) ではガス窒化処理による拡散層の形成により100 μm 程度の圧縮応力が存在した。(図11a)

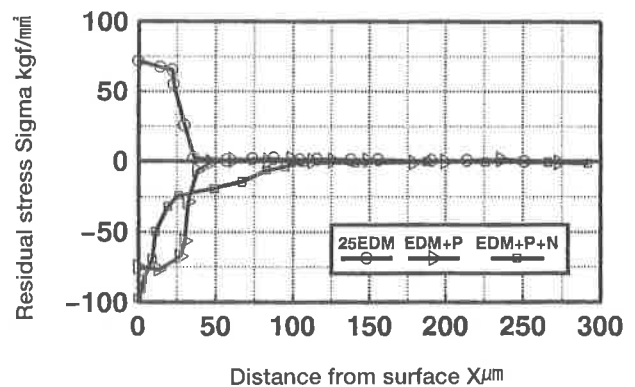
また、ピーニング加工後、ガス窒化処理 (EDM+P+N) を行うと、最表面の圧縮応力値は大きくなり、応力勾配は25 μm 程度まで急激に低下する分布形態をとった。応力作用域深さは100 μm 程度となり、(EDM+P) に比べ拡散層の形成により深くなった。

これらの各試験材の、15000サイクル試験後における結果 (図11b) は試験前と比較して著しく異なった分布形態となった。

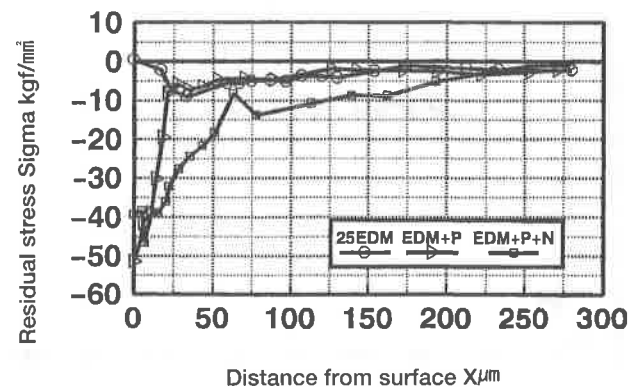
放電加工した試験材の熱疲労試験後の応力分布は最表面がクラックの発生に伴う応力の解放によってゼロとなり、内部に僅かながら圧縮応力の認められる分布形態となった。ピーニング加工 (EDM+P) およびピーニング加工後窒化処理 (EDM+P+N) した試験材において、ピーニング加工材の表面応力値は25 μm 程度の領域に圧縮応力が認められるが、その後は (EDM) の応力分布と同様となった。

ピーニング加工後ガス窒化処理を行った試験材 (EDM+P+N) の場合、表面の応力値は低下し、応力作用域深さが約2倍程度に増加した。

なお、図には示さないが、前述の各試験材における熱疲労試験後の断面に発生したクラック形態は放電加工のまま (EDM) の場合、微細なクラックから大きく成長したクラックまで認められた⁴⁾。



(a) Residual stress distribution curves before thermal fatigue test.



(b) Residual stress distribution curves after thermal fatigue test for 15000 cycles.

Fig.11 Changes in residual stress distribution curves before and after thermal fatigue test.

また、ピーニング加工後ガス窒化処理を行った試験材 (EDM+P+N) の場合はピーニング加工に比べクラックの発生数が僅かながら増加するが、無処理の金型鋼の試験結果に比べ約1/2程度となった。

なお、この試験材の残留応力分布は内部まで圧縮応力が存在し、窒化処理による拡散層中の圧縮応力の残存とピーニング加工により付加された圧縮応力との相乗作用が有効に働き、耐熱疲労特性を向上させている要因になっているものと考えられる。

よって、金型鋼に寿命向上を目的として、各種の表面加工を行う場合においても、表面の残留応力の発生形態および残留応力値の管理を行わなければ有効な表面加工や処理層が得られないことをこの結果は示唆している。

4. おわりに

ダイカスト金型の品質安定化を目的として、金型鋼にガス窒化処理および放電加工面に各種の表面加工を行った各試験材における熱疲労特性等について、主としてX線残留応力による測定結果に基づき述べてきたが、要約すると次のことが明らかとなった。

- 1) 仕上げ放電加工表面には引張残留応力が認められ、応力値は放電加工条件の低下に伴い増加した。
- 2) 仕上げ放電加工後の表面にピーニング加工および窒化処理等の複合表面加工を行うと、表面の引張残留応力は消失し、共に圧縮残留応力となった。
- 3) 金型鋼に窒化処理を行い、窒化物を形成させた試験材の高温域への加熱では、室温で認められた $Fe_{2-3}N$ が分解・消失し、 α Feと酸化物の回折線になることが明らかとなった。
- 4) 放電加工後、ピーニング加工、窒化処理およびレーザー加工を順次行った金型鋼の表面残留応力はレーザー照射時の入熱エネルギーにより応力値が低下する傾向を示した。
- 5) レーザ加工の場合、加工条件の選択により、表面残留応力は引張応力の発生が認められ、金型の表面安定性や表面改質にとって、この応力はクラックの早期発生等有害な欠陥を誘発させることになるため、照射条件を注意深く選択しなければ効果的な成果は期待できないと考えられる。

終わりに、近年の金型加工において、放電加工法は避けられない加工手段であることから、加工面に発生する引張応力の改善方法および磨き作業者の不足や煩雑さを考慮

すると、加工面を如何に安定な状態で維持させるかの対策を模索しなければならないと考える。

本実験結果は加熱-冷却の繰り返し熱サイクルを荷重されるダイカスト金型の品質安定性および寿命向上を目的として複合表面加工の有用性について検討してきたが、窒化処理および複合加工において金型鋼の熱疲労特性の改善が得られる効果的な方法やそれらの現象・メカニズムについては更に検討して行きたいと考えている

。本研究成果の一部は平成5年度から平成7年度までの3ケ年、通商産業省技術研究費補助事業「広域共同研究」により得られたものであり、関係各位に感謝いたします。

参考文献

- 1) 奥野利夫, 田村庸: 鉄と鋼, 79, 9 (1993) 1.
- 2) L-A. Norstrom, B. Klarenfjord and M. Svensson : NADCA Conference, Oct. (1993) T93-075.
- 3) 日原政彦, 向山芳世: 電気加工学会誌, Vol.26, No.52(1993) 16.
- 4) 日原政彦, 電気加工学会誌, Vol.26, No.53(1993) 25.
- 5) L. Eliasson, et.al : Proc. of 2nd Int.Conference on Tooling, Germany, Sep(1989) 3.
- 6) J. V. Skoft : 14th SDCE Conference, May(1987) G-T87-010.
- 7) 日原政彦, 堀越康弘: 日本ダイカスト会議論文集, (1990) JD90-07.
- 8) 八代浩二, 日原政彦, 佐野正明, 萩原 茂: 精密工学会, 1994年春季学術講演会, 3月(1994)
- 9) 三木功, 岡庭 茂, 顔 勉: (株)日軽技研技術資料(1993).
- 10) 日原政彦, 八代浩二, 佐野正明, 向山芳世: 精密工学会・山梨講演会論文集, 10月(1993) 1.