

汎用鉄鋼材料の小ロット金型への適用に関する研究

－汎用鉄鋼材料へのガス窒化処理の適用－

佐野 正明・萩原 義人・星野 昌子・八代 浩二

Study on Applying of General Use Steel Using Minimum Production Molding Mold

－Applying Gas Nitriding Treatment on General Use Steel Using－

Masaaki SAN0, Yoshihito HAGIHARA, Shoko HOSHINO and Koji YATSUSHIRO

要 約

金型材料に汎用鉄鋼材料を適用した場合の、寿命特性について、金型鋼表面に対して窒化処理やショットピーニング処理等の圧縮応力付与となる表面処理を施し、繰返荷重疲労試験および熱疲労試験過程での残留応力や X 線回折図形の変化および断面及び表面の状態の SEM 観察等から検討し、金型への効果的な適用を図ることを目的とし、実験を行った。

その結果、汎用鉄鋼材料を金型材料として使用しても表面処理を施し、材料強度を補うことで、合金工具鋼の 1/5~1/10 程度のショット数となる試作型や小ロット生産型では十分対応可能であることが分かった。

1. 緒 言

工業材料の価格は鉄鋼系材料を中心に高騰してきており、金型材料等の価格についても同様で、現在のところやや落ち着いてきたが、依然高止まり状態が続く、材料の調達には難しい状況にある。特にレアメタルは資源ナショナリズムの急激な高まりにより、輸入困難な状況にも陥っている。このレアメタルは家電製品や情報通信機器をはじめあらゆる製品に組み込まれ、その性質を生かして使用されている。金型材料においても例外ではなく、レアメタルが添加されており、鉄鋼系材料の中でも合金工具鋼と位置付けられ使用されている。

現在は製品製造の生産形態も変わり、従来からの大量生産から多品種小ロットの生産形態へと移行してきている。しかし、金型材料は安定生産を確保する目的から、未だ従来からの高級材料（合金工具鋼）が用いられたままである。試作型も同様であり、未だ高級材料が使われているのが現状である。

また近年では製品市場のグローバル化により海外との価格競争も激化し、低コスト化の要求に歯止めがかからない状態が続いている。製造側の対応としては材料・加工賃・工具・加工時間等を切り詰め、各社様々な対応でしのいできているが、もう限界まで来ている。

これらの動向にあわせて小ロット生産や試作生産のように大量生産を求めない場合には、合金工具鋼にかわり安価で入手しやすい汎用鉄鋼材料での生産を模索する動きが生じてきている。汎用鉄鋼材料は合金工具鋼に比

べ、安価であり、強度（硬さや高温強度）は劣るが、加工性がよく、靱性が高いという特徴があり、小ロット生産には加工効率の点で期待が持てる。ただし、強度が劣っている分を補う手段を講じなければならないが、有効な改善策は未だ見いだされてはいないのが現状である。

そこで本研究では、金型材料に汎用鉄鋼材料を適用した場合の寿命特性について、金型鋼表面に対して窒化処理やショットピーニング処理等の圧縮応力付与となる表面処理を施し、繰返荷重疲労試験および熱疲労試験過程での残留応力や X 線回折図形の変化および表面および断面の状態の SEM 観察等から検討し、金型への効果的な適用を図ることを目的とし、実験を行った。

2. 実験方法

2-1 試験片素材

実験には、機械構造用合金鋼（SCM440, 35HRC）改良材および熱間金型用合金工具鋼（SKD61, 50HRC）改良材を用いた。組成を表 1 に示す。

2-2 試験片形状

繰返荷重疲労試験に用いた試験片形状は JIS14B 号試験片形状に準じた形状であり、図 1 に示すとおり、全形 135×20mm、板厚 5mm、標点間距離 15mm とした。また熱疲労試験用試験片は図 2 に示すとおり φ58mm、t=20mm の円筒形状に加工し、試験片とした。

2-3 加工条件および処理条件

実験には金型の形状加工を想定し、放電加工を行い、その面に対し、表面処理を実施した。

放電加工は電極に銅(φ60mm)を用い、灯油加工液中で、電極極性をプラスとし、仕上げ条件(i_e 2.5A, t_e 5.4 μ s, t_o 5.4 μ s)で行った。実験に用いた形彫放電加工機は、三菱電機(株)、V25F-G35である。

表 1 素材組成成分 (wt%)

素材名 (JIS 相当材)	C	Cr	Mo	V	Si	Mn
機械構造 用合金鋼 (SCM440) 改良材	0.4	2.0	0.2	--	0.3	1.4
熱間金型用 合金工具鋼 (SKD61) 改良材	0.3	5.0	2.3	0.6	0.2	0.5

同加工面への窒化処理はガス窒化処理を適用し、反応促進剤と NH₃ ガスとの混合雰囲気中で 530℃、6 時間保持、ガス冷却の条件で行った。

ショットピーニング処理は砥粒径 50~60 μ m のカーボランダムを用い、噴射圧力 34MPa、トーチ間距離 100mm とし、表面がほぼ全面加工される(カバレッジ)まで行い、加工時間は約 7 秒であった。

2-4 疲労試験

2-4-1 繰返荷重疲労試験

繰返荷重疲労試験は材料試験機(株オリエントテック、UCT-30T)を用い行った。試験条件は低サイクル疲労試験条件とするため、あらかじめ材料の引張試験を行い、得られた荷重-伸び線図により決定した。試験荷重は弾性限界を超え、降伏点荷重の 105%となる荷重とした。試験機の上昇速度は 5mm/min、下降速度は 30mm/min で行った。試験回数は最大 2000Cycle までとした。加工面の評価は、各サイクル時点で、残留応力値の変化から行った。評価位置は標点中央部分の長方形断面 4 か所からの平均値を測定値とした。

2-4-2 熱疲労試験

熱疲労試験は、アルミニウムダイカスト金型の操業状態に類似した加熱-冷却の熱サイクル条件を想定し行い、熱サイクル条件は、加熱(570℃、160S 保持)-冷却(100℃、15S 保持)を 1 サイクルとして、最終 5000Cycle まで試験を行った。試験機の模式図を図 3 に示す。

加工面の評価は、サイクルごとに顕微鏡による断面観察、残留応力の測定および X 線回折による分析から行った。評価位置は端面から 15mm の位置を中心とする幅 5mm の範囲でそれぞれ 90 度方向の 4 か所からの平均値を測定値とした。

3. 結果および考察

3-1 走査型電子顕微鏡(SEM)による断面観察結果

図 4 に試験片断面の走査型電子顕微鏡(SEM)による観察結果を示す。SCM 材(a)、SKD61 材(d)の場合、最表面に放電加工変質層が約 5 μ m 程度の厚さで形成されていた。この放電加工面に対しガス窒化処理を施した場合、SKD61 材(e)では放電加工変質層直下に窒素の拡散層領域が深さ約 50 μ m 程度確認でき、更にショットピーニング処理とガス窒化処理を複合的に施した試験片(f)でも同様に同程度深さの窒素の拡散層領域が認められた。またショットピーニング処理を施すことにより最表面の鋭利な部分は脱落し、表面はややなめらかな形態となった。なお SCM 材((b)および(c))の場合、SKD61 で認められた窒素の拡散層領域は明確には確認できなかった。



図 1 引張試験片の外観写真

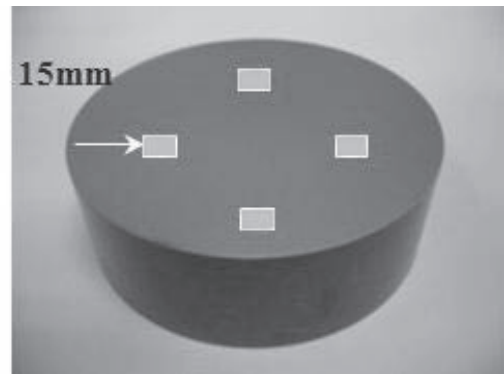


図 2 熱疲労試験片の外観写真

3-2 硬さ分布

図 5 に図 4 と同様の試験片の断面における硬さ分布について測定を行った結果を示す。SCM 材および SKD61 材ともに表面直下部分ではショットピーニング処理とガス窒化処理を複合的に施した場合、硬さの上昇が確認された。深さ 10 μ m の時点で SCM 材では 650HV、また SKD61 材では 1100HV と、ともに母材硬さに比べ約 2 倍程度の硬さとなった。それぞれ表面からの距離が深くなるに伴い、硬さは減少するが、SKD61 材

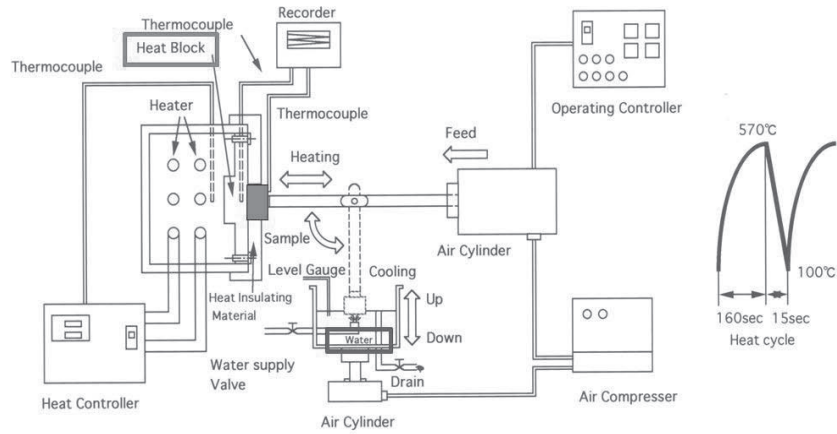


図 3 熱疲労試験機の模式図

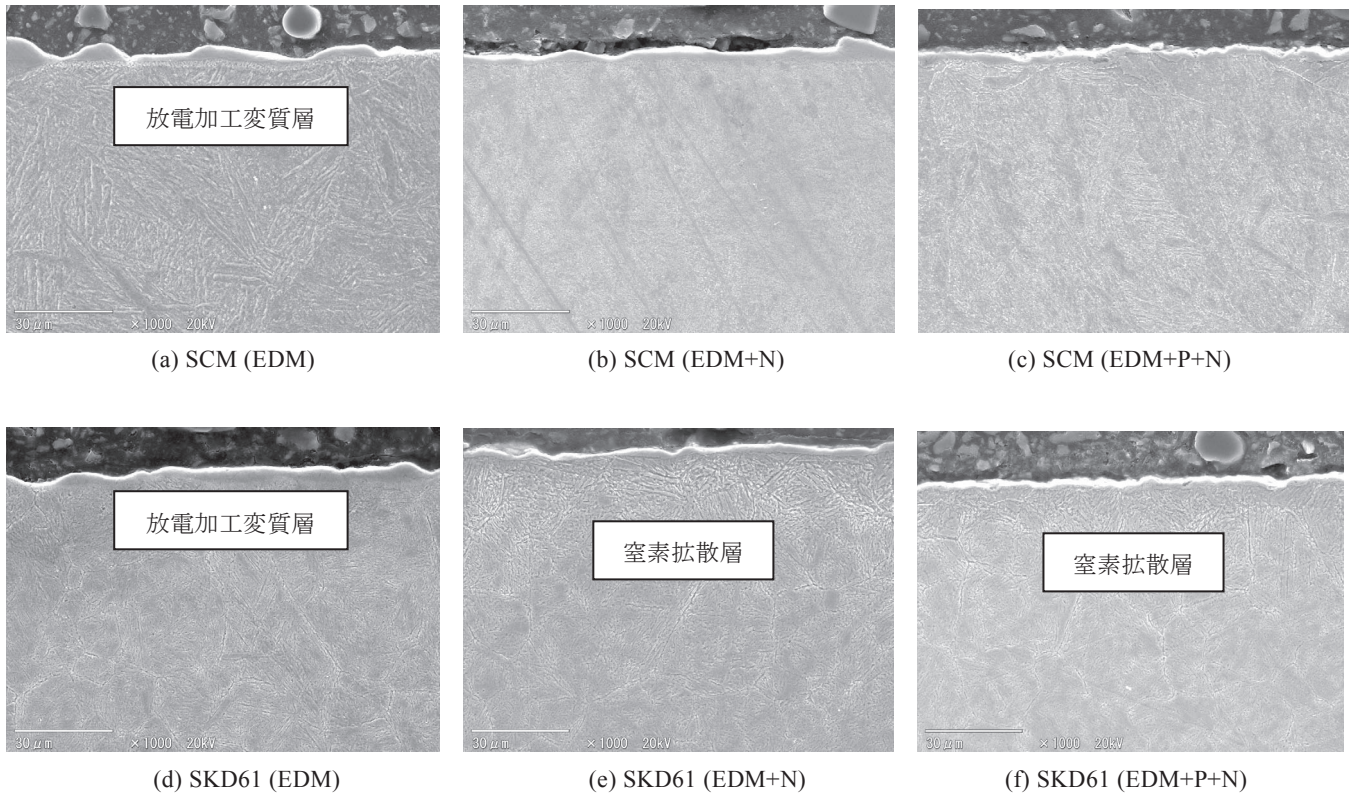


図 4 表面処理後の断面 SEM 観察

では表面から $50\ \mu\text{m}$ 、SCM 材では表面から $30\ \mu\text{m}$ 程度の硬化層領域が確認された。SKD61 材の硬さ増加領域は前節の SEM 観察結果で観察された窒素拡散層領域と一致した。これに対し表面処理を施さない場合、硬さの上昇は認められなかった。しかし前節の SEM 観察結果で最表面には放電加工変質層が残存しているため、おそらく最表面の硬さは上昇していると思われるが¹⁻³⁾、放電加工変質層厚さが $5\ \mu\text{m}$ に満たない程度であったため、最表面から $10\ \mu\text{m}$ 以下の測定範囲内では測定不可能な領域であり、硬さ上昇は確認できないものと思われる。

3-3 繰返荷重疲労試験

図 6 に繰返荷重疲労試験を行った結果を示す。それぞれショットピーニング処理とガス窒化処理を施した試験片の試験サイクル毎の残留応力の変化を示したものであるが、試験前 0Cycle 時点では SKD61 材の各表面処理を施した試験片ともに圧縮残留応力を示したが、500Cycle の疲労試験後では残留応力はそれぞれの試験片ともに、初期のひずみは解消されほぼ 0 に近い状態となった。表面処理の付加により、それぞれの試験片で多少のばらつきはあるが、大きな影響はないという結果であった。最

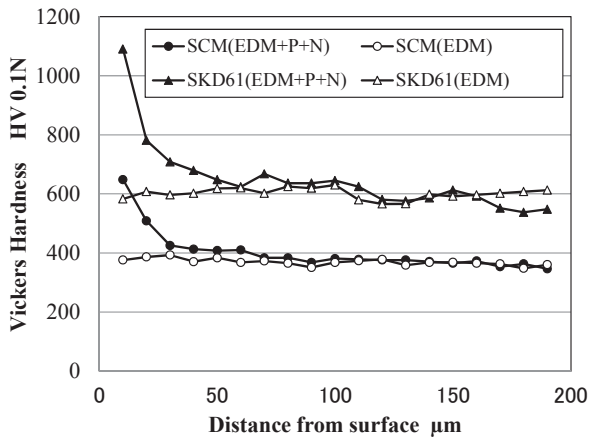
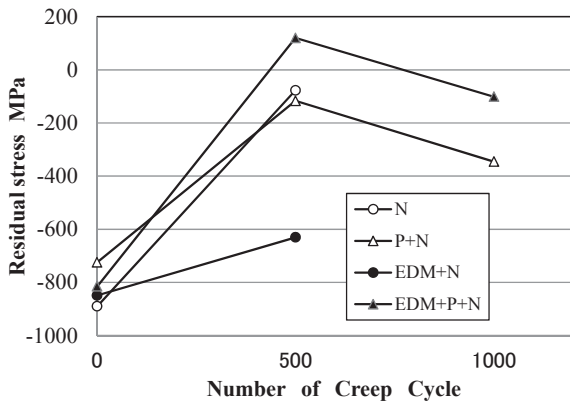
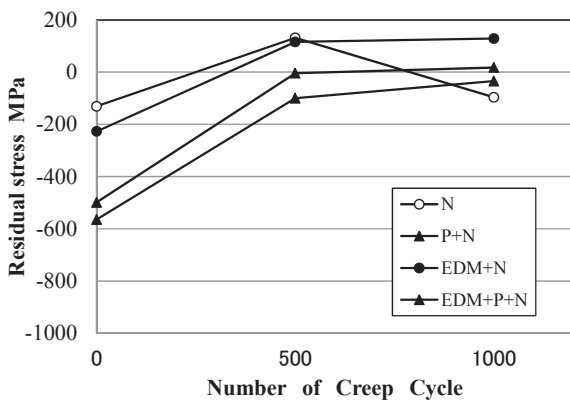


図5 断面における硬さ分布測定結果

表面の状態はクラック発生起点となるため、大きな影響を示すと考えられたが、最表面は形状に大きな変化はなかったこと（放電加工変質層の残存状態、ショットピーニングによる脱落状態）、断面積内における表面処理が影響する割合がごくわずかであるため、大きな変化は認められなかったと考えられる。



(a) SKD61



(b) SCM

図6 繰返荷重疲労試験過程における残留応力の変化

3-4 熱疲労試験

3-4-1 表面状態のSEM観察

図7および図8は熱疲労試験過程におけるSEMによる表面クラックの観察結果である。試験前0Cycleの状態では各試験片ともにクラックのない健全な加工面を示していた。500Cycleの時点でもほぼ同状態を維持していたが、SCM材のEDM試験片については表面にスジ状に形成される酸化物に沿うような形態で、わずかではあるが、クラックの発生が認められた。SCM材のEDM面に表面処理を施した試験片はクラックの発生は認められなかったが、更にサイクル数を増やし1000Cycleの時点ではSCM材のEDM同様EDM+P+N試験片でも、クラックの発生が認められた。最終的に5000Cycle終了時点ではSCM材両試験片ともに、更にクラックは進展している状態を示したが、SKD61材では表面からのクラック

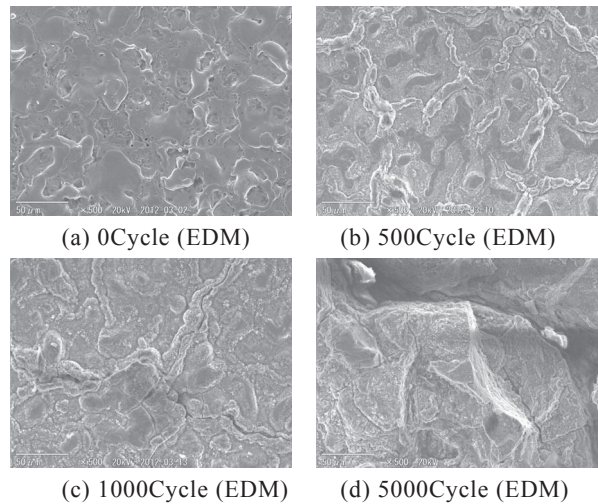


図7 熱試験過程における表面クラックの進展(SCM)

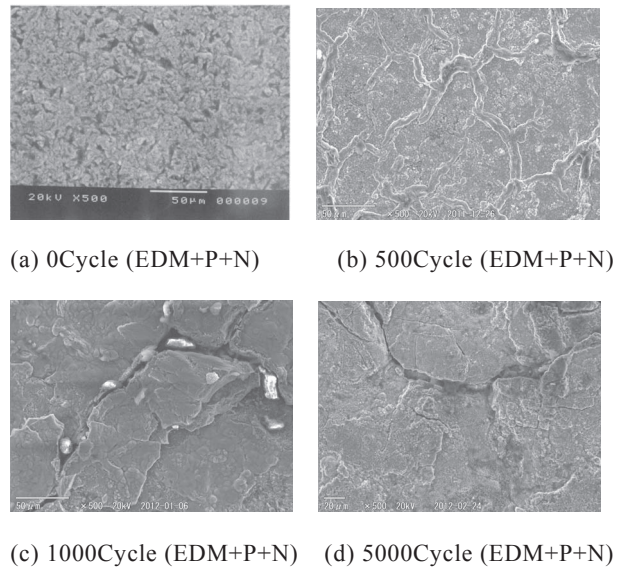


図8 熱試験過程における表面クラックの進展(SCM)

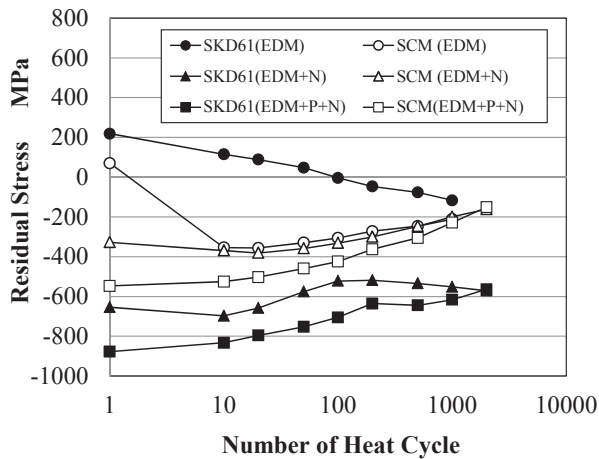


図9 熱試験過程における残留応力の変化

の発生は観察されなかった。

図9に図7.8試験片での残留応力の変化を示す。放電加工したままの試験片はSCM材およびSKD61材ともに試験前0Cycle時点では引張応力を示し、試験回数の増加により引張応力は減少する傾向となった。SKD61材では緩やかに減少し、100Cycle時点で0となった。その後試験回数の増加とともにさらに減少し、最終的には圧縮の状態に推移した。残留応力の減少はひずみの解放に起因するものであり、表面にクラックが発生することで、拘束が解かれ無ひずみの状態0にまで変化したものと考えられる。これに対しSCM材では10Cycle時点で0を超え圧縮へと変化した。これはSCM材はSKD61材に比べ強度は低いが靱性が高いため、加熱-冷却の熱衝撃が負荷された時、特に冷却時において引張応力が最大となった場合でも、割れ(クラック発生)に至らず、健全な状態を保ち、常温状態となった場合に圧縮応力状態となったものと考えられる。

また放電加工面にショットピーニング処理とガス窒化処理を施した試験片ではSCM材、SKD61材ともに試験前0Cycleの状態では-550MPa、-850MPaとともに圧縮応力を示し、この場合も試験回数の増加に伴い、緩やかに減少する形態を示した。SCM材の場合、圧縮応力は試験初期(100Cycleまで)は、-350~-500MPaで安定的に推移したが、200Cycleを超えたあたりから、圧縮応力は少しずつ減少した。これに対しSKD61試験片は多少の推移はあるが、5000Cycleまで、安定的に推移した。

3-4-2 断面状態のSEM観察

図10に熱疲労試験におけるSEMによる断面クラックの観察結果を示す。(a)はSCM材のEDM試験片1000Cycle時点であるが、100 μ mを超えるような大きなクラックが数本観察される。これに対し(b)に示すSCM材のEDM+P+N試験片は50 μ m程度の小さなクラックが数本観察されるのみであり、表面処理によりク

ラックの発生・成長が抑制されていることが確認できる。さらに同試験片について5000Cycleまで試験を行った結果が(c)および(d)であるが、クラックは更に成長し、500 μ mを超えるようなクラックも観察され、金型として使用した場合、大割れとなる危険性が感じられる。これらに対し(e)および(f)はSKD61材に対し、放電加工したままおよび表面処理を付加し熱疲労試験を5000Cycleまで行った試験片の結果である。形状的には鋭利なクラックは確認されず、ところどころ凹形状となった部分が見受けられる。この結果SCM材ではSKD61材のように長期の金型の操業には向かないが、小ロットあるいは試作型であれば、表面処理を施すことで、十分対応できることが分かった。

3-4-3 クラック長さの測定

表2に前節の試験片について、断面における測定範囲内のクラック長さの測定をした結果を示す。SCM材では放電加工面に表面処理を施すことにより、1000Cycle時点において最大クラック長さ(クラックの成長)は抑制され、1/3程度に減少することが分かった。更に両試験片ともに5000Cycle時点まで試験を行うと、

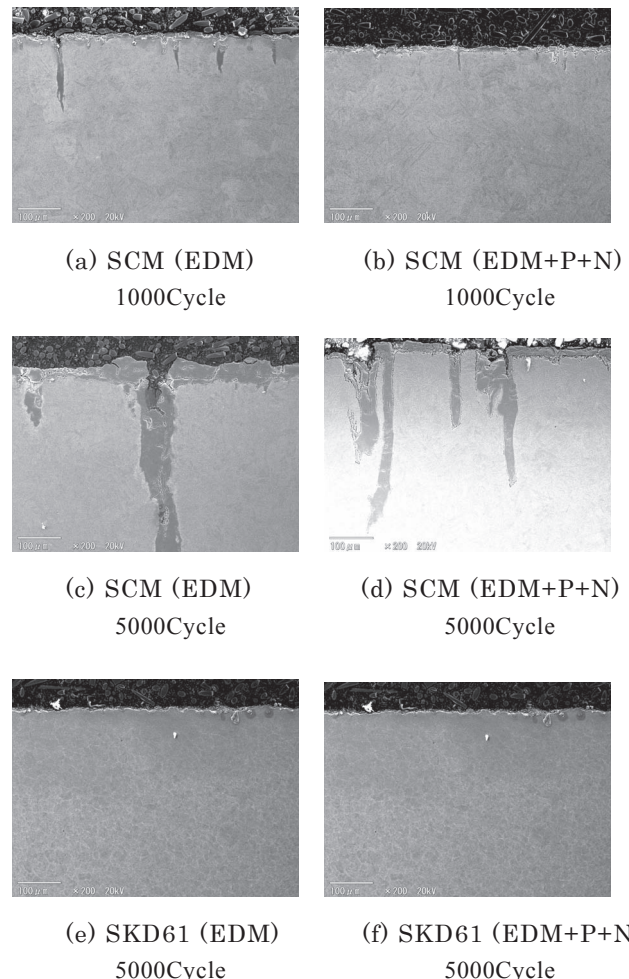


図10 熱試験過程における断面クラックの進展(SCM)

表 2 クラック長さの測定結果

Specimen	Cycle Number	Crack Number	Max. Crack Length
SCM(EDM)	1000	65	208 μ m
SCM(EDM+P+N)	1000	109	74 μ m
SCM(EDM)	5000	47	1012 μ m
SCM(EDM+P+N)	5000	34	711 μ m
SKD61(EDM)	5000	33	24 μ m
SKD61(EDM+P+N)	5000	24	9 μ m

最大クラック長さはともに大きくなり、表面処理の抑制効果はほぼなくなることが分かった。

これに対し、SKD61 試験片の場合、5000Cycle 時点において、放電加工したままの状態でも 24 μ m と小さく、表面処理を施した試験片では、更にクラックの成長は抑制され、ほぼ 1/3 程度の長さまでしか成長しないことが確認された。

4. 結 言

- (1) 放電加工面に対し窒化処理を施した場合、SKD61 材では窒素の拡散層領域が 50 μ m 程度認められたが、SCM 材は窒素の拡散層領域は明確には認められなかった。
- (2) 放電加工面に対し窒化処理を施した場合、SKD61 材の硬度上昇は 50 μ m 程度認められたが、SCM 材では最表面の硬度上昇は 30 μ m 程度であった。ともに母材硬度に対し 2 倍近い値となった。
- (3) 繰り返し荷重試験の結果、SCM 材および SKD61 材ともに、表面処理の付加による残留応力値への大きな影響はないことが分かった。
- (4) 加工面の残留応力は表面処理前が引張であったが、処理後は圧縮となった。また熱疲労試験過程で、表面処理を施した SCM 試験片の場合、圧縮応力は試験初期 (100Cycle まで) は、-350~-500MPa で安定的に推移したが、200Cycle を超えたあたりから、圧縮応力は少しずつ減少し、これに対し SKD61 材は多少の推移はあるが、5000Cycle まで、安定的に推移した。
- (5) 熱疲労試験過程における表面状態は SCM 材の場合、500Cycle 時点から表面にわずかにクラック

が観察されはじめ、1000Cycle 終了時点では多数のクラックが観察された。これに対し表面処理を施した試験片では、500Cycle 時点までクラックの発生は見られず、1000Cycle 時点で表面クラックが観察された。

- (6) 熱疲労試験 5000Cycle 終了時点での最大クラック長さは、SCM 材の場合表面処理を施すことにより、1/3 程度までクラックの成長を抑制する効果があることが分かった。

謝 辞

本研究における実験材料の作製に対し、多大なるご支援ご協力をいただいたウッデホルム株式会社様および株式会社カナック様に深く感謝いたします。

参考文献

- 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, p.1869-1873 (1989)
- 2) 向山 芳世, 日原 政彦: 熱疲労に基因する放電加工面品質の研究 (第 1 報), 電気加工学会誌, Vol. 24, No.48, p.24-34 (1992)
- 3) 佐野 正明, 日原 政彦, 八代 浩二, 向山 芳世: 複合表面処理した放電加工面の熱疲労挙動, 電気加工学会誌, Vol. 31, No.68, p.1-10 (1997)