

拡散窒化法による温・熱間鍛造金型の耐ヒートチェック性の向上について

服 部 悟*
市 村 恒 人**
松 本 賢 治***

[要 旨]

熱間鍛造金型の寿命向上のために行うプラズマ窒化が、ヒートクラックに及ぼす効果を高周波加熱-噴射水冷却サイクル試験で検討した。その結果、表面化合物層の有無、窒化深さが、亀裂の形状、本数、深さに影響することが分かった。

1 緒 言

丹後北部地域では、ロッカーアーム、二股ロッド、カム等の自動車部品、ミシン部品を鍛造法により成形している中小企業が集積している。

近年、わが国におけるものづくり産業は中国へシフトされつつあり、本集積地域における鍛造技術の高度化・差別化は急務となっている。

そこで、鍛造技術の中でも鍛造金型の金型寿命に関して重要な、耐ヒートチェック性の面から検討した。

熱間鍛造金型表面には熱サイクルの繰り返しによる熱応力の結果、ヒートクラックが発生し、これが金型寿命の決定的要因となる。また、金型にはプレス成形時に剛性・耐摩耗性が要求され、通常そのために金型表面に窒化処理等により硬化層を設けることが有効とされている。しかし一方で、硬化層がヒートチェックに対してどう影響するかまだ不明な点が多い。そこで本研究では、耐ヒ-

トチェック性に対するプラズマ窒化処理およびプラズマ窒化後に高周波焼入を行う複合熱処理の効果を検討した。

2 実験方法

今回実験には、熱間金型用合金工具鋼である S KD61 および SKT4 を用い、焼入-焼戻しにより硬さをそれぞれ HRC50.5、HRC46 に調質したものを用意した。表 1 に供試材の化学成分を示す。次に試験片として 15mm×15mm×15mm に加工し、ヒートチェック試験面はバフ研磨により鏡面仕上げとした。

プラズマ窒化処理は表 2 に示した条件で行い、条件 A と C は、窒化処理後周波数 400kHz、出力 4kW で高周波焼入れを行った。

ヒートチェック試験は高周波加熱-噴射水冷却方式で行った。試験機の外観を図 1 に示す。周波数 400kHz、最大出力 4kW の誘導加熱用電源装置にサイクル試験とするため、カウンター部を取り付け、コイル中央に噴出口のある端面焼用のコイルを使用し加熱-冷却を繰り返すようにし、ヒートチェック試験機とした。試験前に、試験片表面に熱電対を溶接し、最高温度が 600℃ になるよう

地域産業集積活性化関連機関支援強化事業

- * 技術支援課 技師
- ** 技術支援課 主任研究員
- *** 研究開発課 主任研究員

表1 供試材の化学成分値 [%]

	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	備考
SKD61	0.37	0.97	0.42	0.009	0.001	—	—	5.10	1.22	0.85	HRC50.5
SKT4	0.50	0.20	0.98	0.011	0.007	0.007	1.98	1.25	0.49	0.12	HRC46.0

表2 プラズマ窒化処理条件

	加熱温度, K	時間, h	PN ₂ , Torr	PH ₂ , Torr	電圧, V	電流, A
A	823	16	0.4	3.6	200	0.2
B			2.0	2.0	200	
C			3.6	0.4	180	
D		20	3.6	0.4	180	

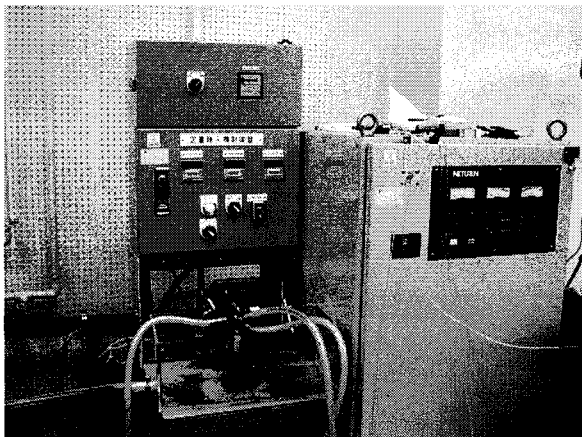


図1 ヒートチェック試験機外観

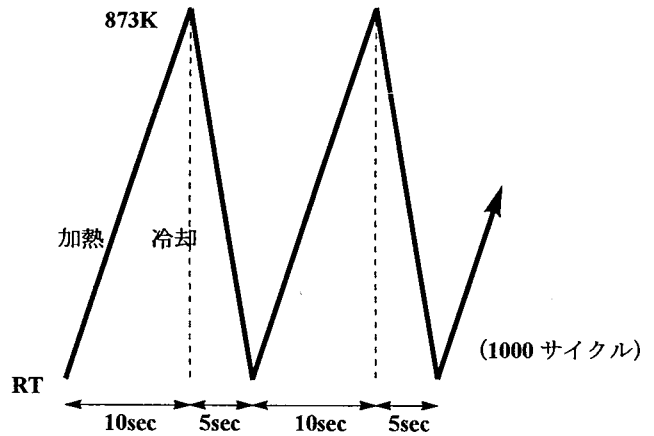


図2 熱サイクルパターン

に出力を調整した後試験を開始し、図2に示す熱サイクルパターンで1000サイクル行った。試験片は適宜切断し、組織観察、表面硬さ分布測定、EPMAによる線分析を行った。ヒートチェック試験後は、クラックの形態を表面および横断面から観察した。

3 実験結果・考察

プラズマ窒化後の断面組織を表3、4、表面のX線回折結果を図3に示す。プラズマ窒化処理条件により化合物層の厚さを変化させたところ、SKD61、SKT4ともPN₂ = 0.4Torr (条件A)

では断面組織には化合物層は見られなかった。しかし表面のX線回折結果からSKT4には、わずかにγ'-Fe₄Nが生成しているのが認められた。窒素分圧を高めるに従って化合物層は厚くなりPN₂ = 3.6Torr (条件C)では、それぞれ12μm、15μmであった。また、拡散層深さも変化し、組織写真及び図4、5に示すEPMAによる線分析の結果から、SKD61ではPN₂ = 0.4TorrとPN₂ = 3.6Torrでは約2倍の差があった。これは、窒素分圧を変えることで試料表面の窒素濃度勾配が変わるためと考えられる。さらに、SKD61とSKT4では、窒素との親和性の高いCr量の差が拡散深さに影響し、拡散深さは後者の方が2倍以

表3 プラズマ窒化組織およびヒートチェック試験後のクラック形態 (SKD61)

	プラズマ窒化後の横断面組織	ヒートチェック試験後の横断面	ヒートチェック試験後の表面外観
無処理			
A			
B			
C			
D			

200 μm

400 μm

400 μm

表4 プラズマ窒化後組織およびヒートチェック試験後のクラック形態 (SKT4)

	プラズマ窒化後の横断面組織	ヒートチェック試験後の横断面	ヒートチェック試験後の表面外観
無処理			
A			
B			
C			
D			

200 μm

400 μm

400 μm

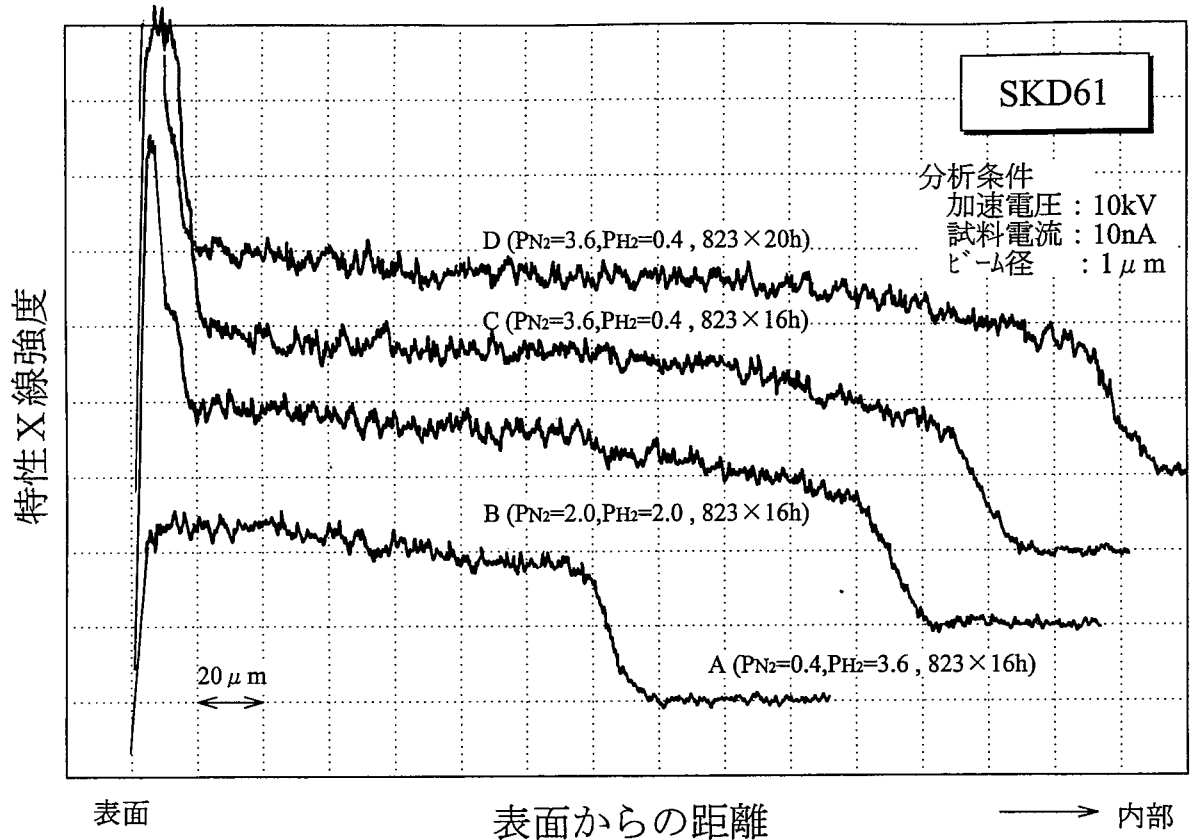


図3 各プラズマ窒化条件における窒素のEPMA線分析結果

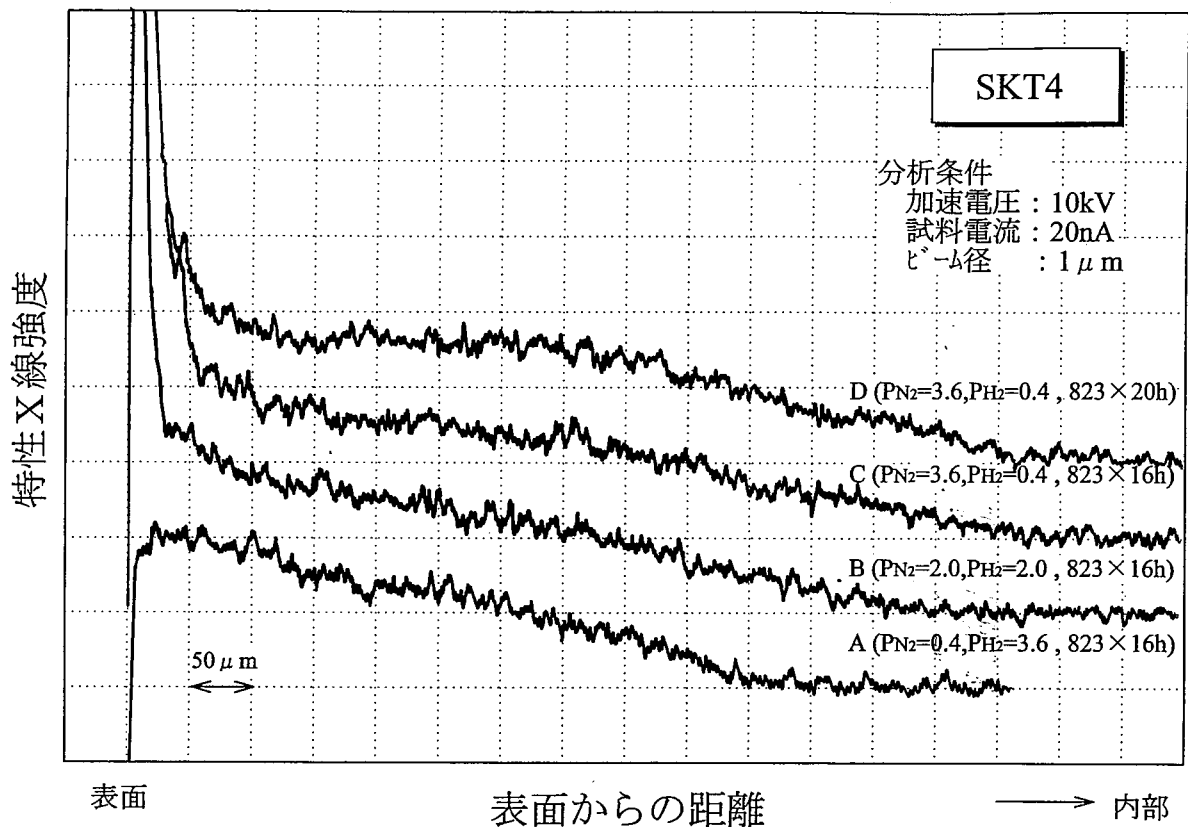


図4 各プラズマ窒化条件における窒素のEPMA線分析結果

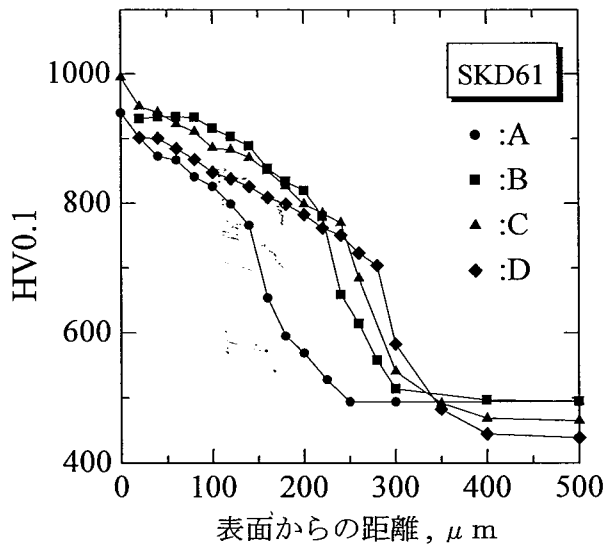


図5 各プラズマ窒化条件における硬さ分布

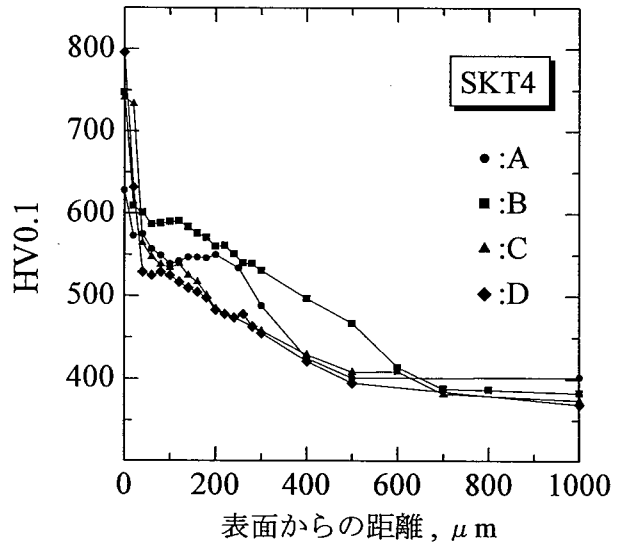


図6 各プラズマ窒化条件における硬さ分布

表5 プラズマ窒化層の状況

	SKD61		SKT4	
	化合物層厚さ, μm	拡散層厚さ, μm	化合物層厚さ, μm	拡散層厚さ, μm
A	なし	150	わずかに有り	510
B	5	240	8	600
C	12	270	15	700
D	8	310	13	710

上深くなった。SKD61において化合物層が生成しない $\text{PN}_2 = 0.4$ (条件A)では、他の条件に比べ拡散層の窒素濃度が低くなった。これは窒素分圧が低いため表面からの窒素の供給量が少なく、内部への拡散による消費量に追いつかなかったためと考えられる。これらプラズマ窒化条件を変えた時の窒化層の状況を表5にまとめた。

各プラズマ窒化処理条件における硬さ分布を図6、7に示す。SKD61では、化合物層を含む表面硬さはHV1000を超え、内部への硬さの推移はEPMA線分析による窒素濃度分布に対応していた。EPMA分析において窒素濃度が低かった条件A ($\text{PN}_2 = 0.4\text{Torr}$)での硬さは全体的に低かった。ただし、硬化深さはEPMA線分析から求めた窒素拡散深さより深くなっているが、これは、表面より窒素が侵入・拡散することにより

表面部の炭素が内部に押しやられ、窒素拡散層下にC濃化層が形成されるためである¹⁾。

次に、表3、4のヒートチェック試験後の表面の外観写真は大きく3種類に分けられる。一つめのタイプは、無処理試験片にみられる小さな多角形状亀裂で、横断面写真から $50\mu\text{m}$ 以下の微細な亀裂が密に生成しているもの。二つめは、化合物層の生成しない処理条件Aに見られる小さく波打った断続的な亀裂で、亀裂本数は前者に比べ少ないが亀裂は深い。三つめは、化合物層が存在する処理条件B、C、Dに見られる直線的で連続した四角形を基本としたような亀裂で本数は少ないが深く、また良く見ると大きな亀裂間に微細な亀裂が多数みられた。この微細な亀裂は、化合物層が加熱-冷却のサイクル中に母材との熱膨張率の差による応力で破壊したもので、そのうちの幾つかが

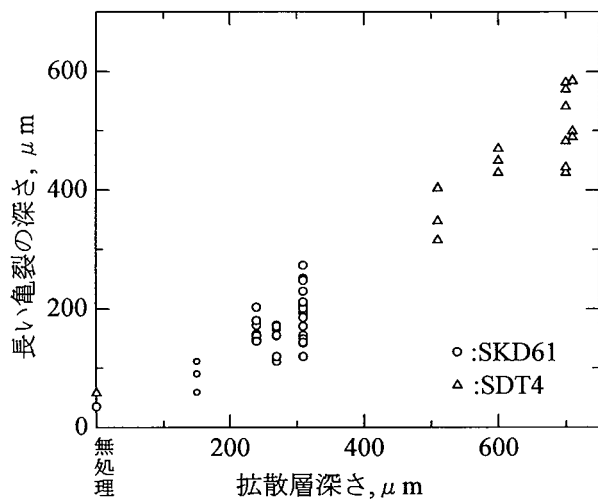


図7 拡散層深さと亀裂深さの関係

大きな亀裂へ成長していると思われる。この亀裂外観のタイプはプラズマ窒化処理条件が同じであればSKD61、SKT4とも同じ傾向であった。これら表面の亀裂形状は、試験片表面の強度（硬度）と化合物層の有無で決まるようである。

また断面写真から亀裂の進展深さを測ると無処理 < 処理条件A < 処理条件B、C、Dの順に深くなる傾向があり、SKD61よりSDT4の方が亀裂は深かった。そこで図8に示すように拡散層深さと亀裂深さの関係をみたところ相関があり、亀裂深さは窒化深さの影響を受けることが分かった。これは、一旦発生したクラックは靱性の低い窒化層内を進み、母材に達すると進展速度が遅くなるために窒化深さの深いものほど、内部までクラックが進展しているものと思われる。またクラックの開口部について見ると無処理のものは肩部が損傷し口が広がっているのに対して、窒化したものは開口部は狭く肩部の損傷は少なかった。これは、無処理のものは加熱時の熱膨張による圧縮応力で座屈したり²⁾、高温での酸化のために開口部が広がると考えられ、窒化処理することで強度を増し座屈、また酸化を抑制しているものと思われる。

ヒートクラック現象は、金型表面における加熱一

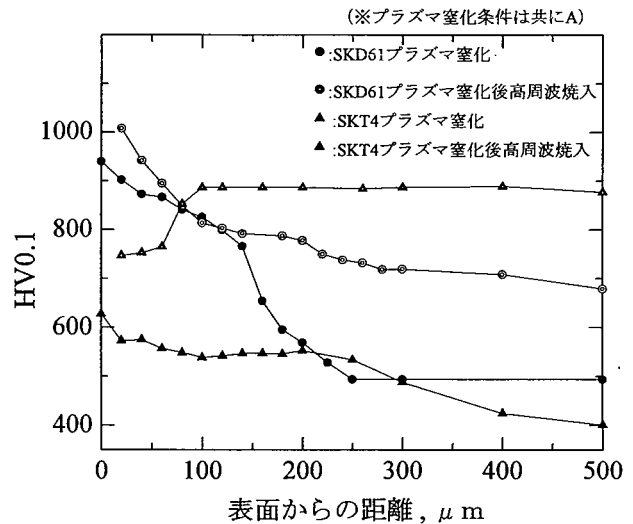

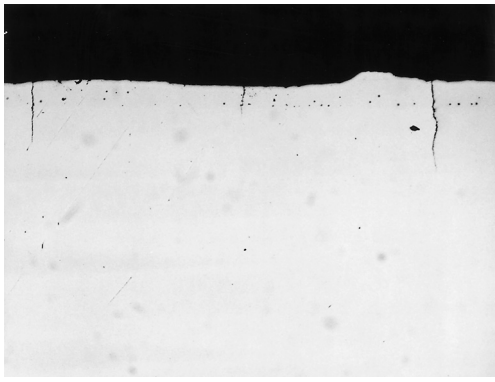
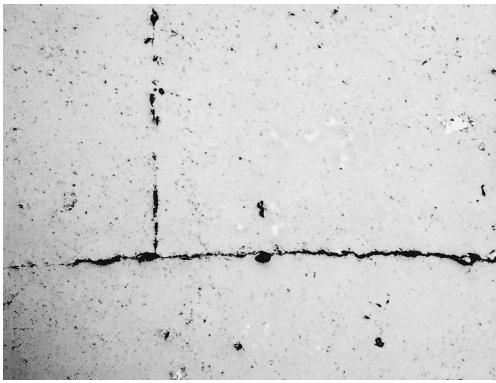



図8 プラズマ窒化後の高周波焼入の硬さへの影響

冷却による熱応力が、破壊強度（疲労強度）を超えたとき生じるものだとすれば、窒化により表面強度を高めることは有効であるが、一旦クラックが発生すると靱性の低い窒化層は亀裂の進展を早めることを考えれば、窒化条件として、亀裂を誘発する化合物層が無く、拡散層の薄い条件が効果的であると考えられる。




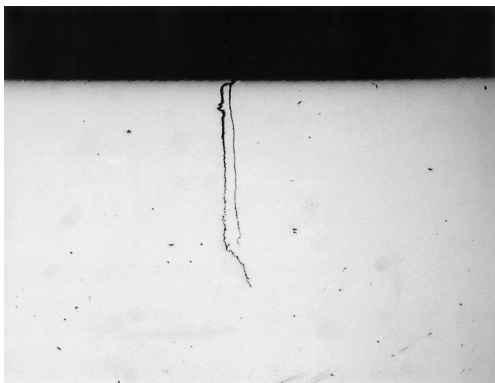
次に、プラズマ窒化後に高周波焼入れを行う処理を検討した。以前、S45C等の機械構造用鋼において窒化後に高周波焼入れを行うと、表面硬さの向上、表面圧縮応力の増加がみられたことからヒートチェックに対する効果を調べた。まず、図9に硬さ分布を示す。SKD61では表面層で硬さと、焼入れにより母材の硬さが上昇した。SKT4では、焼入れ硬さとなっているが表面下100μmで硬さの低下が見られた。酸化脱炭層が生じているためと思われる。また、このときの表面応力は、プラズマ窒化時がSKD61、SKT4それぞれ55.8 kg/mm²、19.7kg/mm²の圧縮応力であったのに対して、1.2kg/mm²、1.1kg/mm²と圧縮応力が減少した。ヒートチェック試験後の表面外観写真、断面写真および亀裂長さを表6、7および図10に示す。亀裂本数は減少するが、亀裂深さはかなり深くなり、こ

表6 プラズマ窒化後の高周波焼入の影響 (SKD61)

	ヒートチェック試験後の表面外観	ヒートチェック試験後の横断面
プラズマ窒化処理条件A		
プラズマ窒化処理条件C		

400 μm

表7 プラズマ窒化後の高周波焼入の影響 (SKT4)

	ヒートチェック試験後の表面外観	ヒートチェック試験後の横断面
プラズマ窒化処理条件A		
プラズマ窒化処理条件C		

400 μm

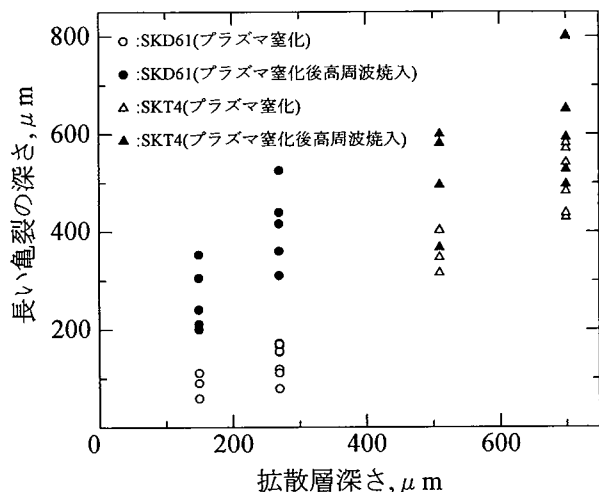


図9 亀裂深さに対するプラズマ窒化後の高周波焼入の影響

の処理によるヒートチェックの改善の兆しはみられなかった。

(まとめ)

熱間鍛造金型に用いられる熱間金型用合金工具鋼 SKD61、SKT4 の耐ヒートチェック性向上を目的として、プラズマ窒化処理およびプラズマ窒化後に高周波焼入を行う複合熱処理の効果、高周波加熱-噴射水冷却方式の熱疲労試験を中心に検討した結果、以下のことが分かった。

- 1) ヒートチェック試験後の表面亀裂の形状は、表面強度(硬さ)、化合物層の有無で異なり、強度を上げると亀裂本数は減り、化合物層が存

在しない場合は断続波状、存在する場合は連続した直線状の亀裂となる。

- 2) 拡散層深さと亀裂深さには相関があり、拡散層は亀裂の進展が速いため、窒化層が深いほど亀裂も深くなる。
- 3) プラズマ窒化処理することで亀裂開口部の損傷を抑えることができる。
- 4) プラズマ窒化後に高周波焼入を行う複合熱処理は、焼入により表面硬度は上がるが硬化層が深くなるため等により深い亀裂が生じ、ヒートチェック抑制の効果は認められなかった。

(謝辞)

本研究を行うにあたり、ご助言およびサンプル作製にご協力をいただきました財団法人 応用科学研究所 桑原秀行氏に深く感謝申し上げます。

〈文献〉

- 1) 岡 圭男ほか：熱間工具材料の表面層の改善 研究部会 共同研究成果発表会講演集、日本熱処理技術協会、p17 (1998)
- 2) 大藤 孝ほか：金型のヒートチェック 研究部会 共同研究成果発表会講演集、日本熱処理技術協会、p16 (1995)