

バルクハウゼンノイズ解析による焼入条件を変えた熱間工具鋼の焼入冷却速度と靱性の非破壊評価

中 居 則 彦*・小 幡 充 男*²

Non-destructive Evaluation of Cooling Rate and Toughness in Hot-work Tool Steel Quenched from Various Austenitization Temperature by Barkhausen Noise Analysis

Norihiko NAKAI and Mitsuo OBATA

Synopsis:

The purpose of this paper is to develop a non-destructive method for evaluating the cooling-rate (time for cooling from austenitization temperature (T) to 500°C (Ht)) generally in tempered specimens 0.4C-5Cr-Mo-V hot-work tool steel after quenching from a constant austenitization temperature within 1015~1035°C. For this, the authors tried to employ Barkhausen Noise (BHN) signals which were induced during magnetization process. The BHN signals were measured on the surfaces of specimens, which were quenched with various T and Ht , and were tempered to adjust the hardness (H). The experimental results indicated that the total energy (Vp) of BHN signals was strongly related with microstructure which changed depending on T and Ht . These relationships could be successfully generalized as experimental expressions in the form of $Ht=f(H, Vp, T)$. These results made it clear that non-destructive evaluation of Ht could be achieved generally by using a hybrid method combining the BHN method with an ordinary hardness test when specimens were austenitized at a constant temperature within 1015~1035°C. The authors also confirmed the possibility of general estimation of Charpy impact values (Ch) through the generalized relationship between Ht , H , T and Ch when austenitization temperature was set at a constant temperature within 1015~1035°C.

Key words: non-destructive evaluation; hot-work tool steel; Barkhausen noise effect; cooling rate; austenitization temperature; toughness; hardness.

1. 緒 言

著者らは前報¹⁾にて、熱間金型の熱処理後の靱性の非破壊評価法を確立するための基礎研究として、0.4C-5Cr-Mo-V 熱間金型鋼の標準焼入温度 (1020°C) からの焼入れ焼もどし材を用いて、磁化過程で発生する全バルクハウゼンノイズ (BHN)^{2)~14)} 信号のエネルギーの総和 (Vp)、焼入れ半冷時間 (Ht)[†]、硬度 (H)、シャルピー衝撃値 (Ch) の関係を調べ、これらの関係式より Ht を推定および Ch を非破壊評価する方法を報告した。前報によれば、 Ht 、 Ch はそれぞれを次式のような形で表される。

$$Ht = \alpha_1 + \beta_1 \cdot dVp \text{ (min)} \dots\dots\dots (1)$$

$$\alpha_1 = -300 + 11.3 \cdot H - 0.106 \cdot H^2$$

$$\beta_1 = -495 + 17.2 \cdot H - 0.0953 \cdot H^2$$

$$Ch = \delta_1 + \gamma_1 \cdot H \text{ (kg} \cdot \text{m/cm}^2\text{)} \dots\dots\dots (2)$$

$$\delta_1 = 17.3 - 2.56 \cdot \log(Ht)$$

$$\gamma_1 = -0.266 + 0.0249 \cdot \log(Ht)$$

ただし $\text{HRC}43 \leq H \leq \text{HRC}51$

したがって、 Vp を BHN 法¹⁾にて求めるとともに、 H を硬度試験にて求めることにより、 Ht を推定および Ch を非破壊評価することができる。

前報は、焼入温度 (T) を標準温度 1020°C に設定した場合の結果である。しかし、実際の金型の焼入温度は、通常、靱性を優先する場合は 1020°C より低め

[†] 焼入温度から 500°C までの冷却時間

平成 2 年 4 月 9 日受付 (Received Apr. 9, 1990)

* 日本高周波鋼業(株) (東北大学工学部へ出向中) (Tohoku University, Aza-Aoba Aramaki Aoba-ku Sendai 980)

*² 東北大学工学部 工博 (Faculty of Engineering, Tohoku University)

ようにして V_p を求める方法を前報¹⁾にて BHN (P) 法として提案した。) 詳細は、前報を参照されたい。(なお、前報で提案した BHN (H) 法 (BHN 信号の最大瞬間出力値を求める方法) による結果も、BHN (P) 法による結果と同じになった。)

3. 実験結果

3.1 半冷時間の非破壊評価

焼入温度 (T) 990, 1050°C で、半冷時間 (Ht) 3, 45 min 材の BHN (P) 法¹⁾により求めた BHN 出力値 (V_p) と最大磁化電圧 (V_m) との関係をそれぞれ Fig. 2 に示す。いずれの V_p も、標準焼入温度 $T=1020^\circ\text{C}$ の場合と同様、 V_m の増加とともに急激に増加し、最大値を示した後、直線的に緩やかに低下している。このように本研究での V_p も、前報¹⁾と同様、 V_m 依存性を有することから、測定値を相互比較する場合、同一 V_m での V_p を用いて比較する必要がある。そこで、前報と同様に、 V_p が V_m に直線的に依存する関係を利用して、両者の関係を一次式で近似し、 $V_m=0$ (V) での V_p (以後 V_p^* と表す) を V_p の代表値として用いることにした。次に、 V_p^* の測定装置依存性をなくすために、前報と同様、式(3)により V_p^* を規格化し、 Ht を推定するパラメーターとした。(なお、 A , B に任意の試料の V_p^* を選ぶことができるが、本結果を前報の標準焼入温度 $T=1020^\circ\text{C}$ の場合の結果と比較するため、前報と同じ試料を用いた。)

$$dV_p = (V_{p_i}^* - A)/(B - A) \dots\dots\dots (3)$$

ここで A ; $T=1020^\circ\text{C}$, $Ht=3$ min, $H=\text{HRC}51.4$ 材の V_p^* , B ; $T=1020^\circ\text{C}$, $Ht=3$ min, $H=\text{HRC}37$ 材

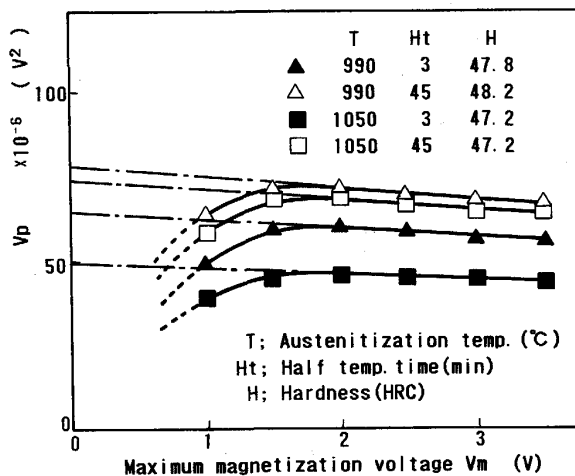


Fig. 2. Variations of BHN parameter (V_p) with maximum magnetization voltage (V_m) and austenitization temperature (T).

の V_p^* , $V_{p_i}^*$; 各試料の V_p^*

こうして求めた $T=990, 1050^\circ\text{C}$ での各半冷時間における dV_p, H の関係を Fig. 3(a), (b) にそれぞれ示す。Fig. 3(a), (b) に示されるように $T=990, 1050^\circ\text{C}$ の場合も $T=1020^\circ\text{C}$ の場合と同様、 dV_p は、定性的には、 H が小さくなるにしたがい、また、 Ht が大きくなるにしたがい増加している。しかし、 dV_p, H, Ht の定量的な関係は、設定焼入温度が異なると異なっ

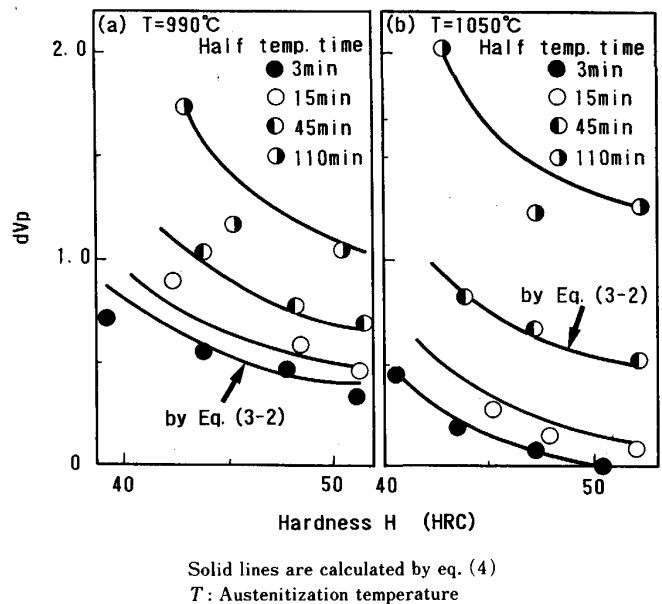


Fig. 3. Variations of BHN parameter (dV_p) with hardness (H) and half temperature time (Ht).

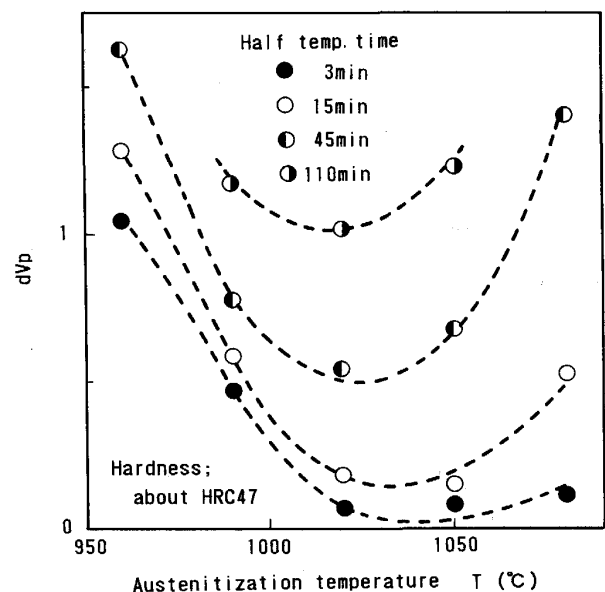


Fig. 4. Variations of BHN parameter (dV_p) with austenitization temperature (T) and half temperature time (Ht) at the hardness of about HRC47.

た. たとえば, 同じ硬度約 HRC47 の場合, 各半冷時間における dVp は, Fig. 4 に示されるように, およそ $T = 1020^{\circ}\text{C} \sim 1040^{\circ}\text{C}$ で最も小さく, T がそれより低くても高くても増加している. また, このことは, HRC 43~HRC51 の範囲の他の任意硬度で一定の場合も同様である. 以上より, 前報の標準焼入温度 ($T = 1020^{\circ}\text{C}$) の場合に誘導した Ht, H, dVp の関係式(式(1))では, 設定焼入温度が標準温度 1020°C と異なる場合, Ht を正確には推定できないことがわかった.

もし, $T = 990 \sim 1050^{\circ}\text{C}$ における Ht, dVp, H の関係式を T を含む $Ht = f(dVp, H, T)$ の形で総合的に表すことができれば, 通常の焼入温度範囲 ($1015 \sim 1035^{\circ}\text{C}$) の任意の一定焼入温度におけるこれらの関係式を実験的に新たに求めることなしに, この焼入温度範囲 ($1015 \sim 1035^{\circ}\text{C}$) において, Ht を推定できることになる. そこで, 次に, Ht, dVp, H, T の関係式を, $Ht = f(dVp, H, T)$ の形で総合的に表すことを試みた. その結果を式(4)に示す.

$$Ht = \alpha_1 + \beta_1 \cdot dVp \dots \dots \dots (4)$$

$$\alpha_1 = A_0 + A_1 \cdot H + A_2 \cdot H^2$$

$$A_0 = -325 - 13.0 \cdot (T - 1020) + 0.310 \cdot (T - 1020)^2$$

$$A_1 = 11.6 + 0.532 \cdot (T - 1020) - 0.0123 \cdot (T - 1020)^2$$

$$A_2 = -0.102 - 0.00503 \cdot (T - 1020) + 0.000109 \cdot (T - 1020)^2$$

$$\beta_1 = B_0 + B_1 \cdot H + B_2 \cdot H^2$$

$$B_0 = -440 + 10.2 \cdot (T - 1020)$$

$$B_1 = 17.1 - 0.369 \cdot (T - 1020)$$

$$B_2 = -0.119 + 0.00282 \cdot (T - 1020)$$

ただし $\text{HRC } 43 \leq H \leq \text{HRC } 51, 990^{\circ}\text{C} \leq T \leq 1050^{\circ}\text{C}$

式(4)に Ht, H, T を代入し逆算して求めた $d\bar{V}p$ の値と実験により求めた dVp の値とを比較した結果を Fig. 5 に示す. Fig. 5 に示されるように, 計算値と実験値は, おおむね一致している. 従って, BHN (P) 法により求めた Vp^* を式(3)により規格化した値 (dVp), 硬度試験によって求めた H と焼入温度 (T) を式(4)に代入することにより, 金型の通常焼入温度範囲において, Ht を総合的に推定することができることがわかった.

4. 考 察

本材料のシャルピー衝撃値 (Ch) は, 焼入温度 (T) と硬度 (H) と半冷時間 (Ht) に影響される^{16)~22)}. 前報では, 標準焼入温度 $T = 1020^{\circ}\text{C}$ の場合の Ch, H, Ht の関係式(式(2))をあらかじめ求めておき, 実際に H を測定するとともに, BHN (P) 法により Ht を推定することにより, 焼入温度が標準温度 $T = 1020^{\circ}\text{C}$ の場合において, Ch を非破壊的に評価できることを報告した. ここでは, $T = 990 \sim 1050^{\circ}\text{C}$ における T, H, Ch, Ht の総合的な関係式 ($Ch = f(Ht, H, T)$) を求めることで H を実測し, かつ式(4)より Ht を推定することにより, 焼入温度が通常温度範囲 ($T = 1015 \sim 1035^{\circ}\text{C}$) における任意の一定温度に設定された場合の Ch を, 総合的に非破壊評価する方法を検討する. また, dVp , ミクロ組織, Ch の関係をも考察する.

4.1 シャルピー衝撃値の推定

$T = 990, 1050^{\circ}\text{C}$ から焼き入れ焼きもどされた材料の Ht, H, Ch の関係をシャルピー試験により求めた. その結果を, Fig. 6 (a), (b) にそれぞれ示す. Fig. 6 (a), (b) に示されるように, Ch は $T = 990, 1050^{\circ}\text{C}$ の場合も, 定性的には前報¹⁾での標準焼入温度 $T = 1020^{\circ}\text{C}$ の場合と同様に, H および Ht に依存しており, H が高くなるほど, また Ht が長くなるほど低下している. しかし, Ht, H, Ch の定量的な関係は, Fig. 7 に示されるように T が異なると異なった. すなわち, 各 Ht 材の Ch は, 同じ硬度およそ HRC47 の場合, $T = 1015 \sim 1020^{\circ}\text{C}$ でもっとも高く, T がそれより低くても高くても低下している.

もし, $T = 990 \sim 1050^{\circ}\text{C}$ の範囲において, Ch, Ht, H の関係式を T を含む $Ch = f(Ht, H, T)$ の形で総合的に表すことができれば, 通常の焼入温度範囲 ($1015 \sim 1035^{\circ}\text{C}$) において, Ht を推定できることになる. そこで, Ch, Ht, H, T の関係式を T を含む $Ch = f(Ht, H,$

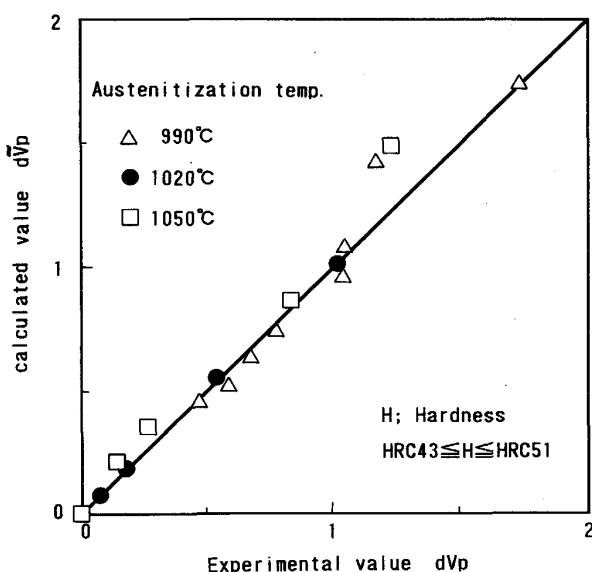


Fig. 5. Variations of calculated value ($d\bar{V}p$) with experimental value (dVp).

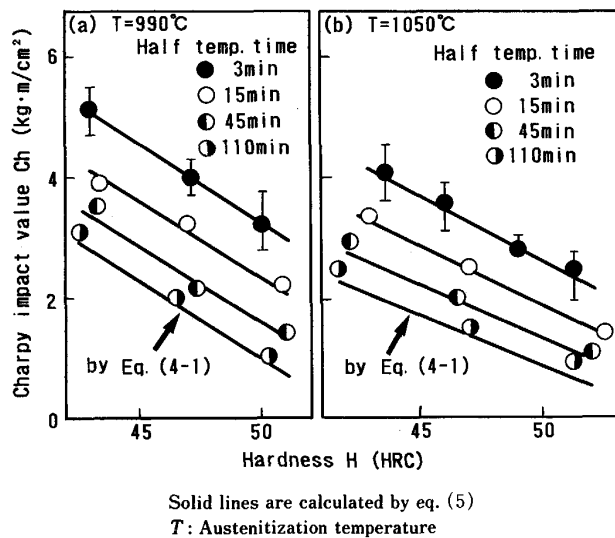


Fig. 6. Variations of BHN parameter (dVp) with hardness and half temperature time.

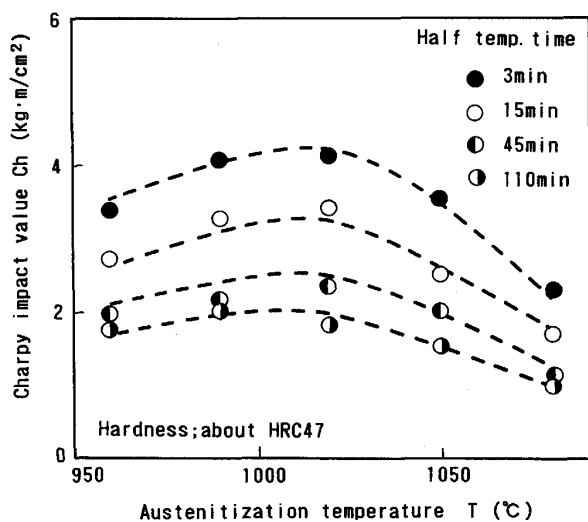


Fig. 7. Variations of Charpy impact value (Ch) with austenitization temperature (T) and half temperature time (Ht) at the hardness of about HRC47.

T) の形で総合的に表すことを試みた。その結果を式 (5) に示す。

$$Ch = \delta_2 + \gamma_2 \cdot H \dots \dots \dots (5)$$

$$\delta_2 = C_0 + D_0 \cdot \log(Ht)$$

$$C_0 = 16.6 - 0.0377 \cdot (T - 1020) - 5.21 \cdot 10^{-5} \cdot (T - 1020)^2$$

$$D_0 = -2.14 - 0.0157 \cdot (T - 1020) - 1.29 \cdot 10^{-5} \cdot (T - 1020)^2$$

$$\gamma_2 = C_1 + D_1 \cdot \log(Ht)$$

$$C_1 = -0.252 + 4.67 \cdot 10^{-4} \cdot (T - 1020)$$

$$D_1 = 0.0171 + 4.20 \cdot 10^{-4} \cdot (T - 1020)$$

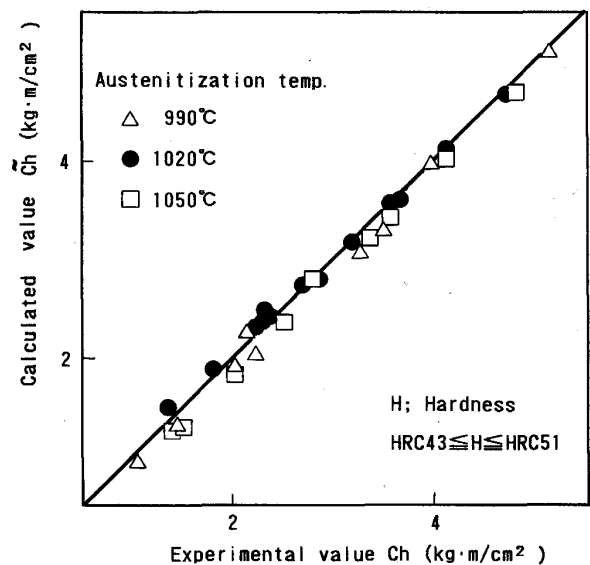


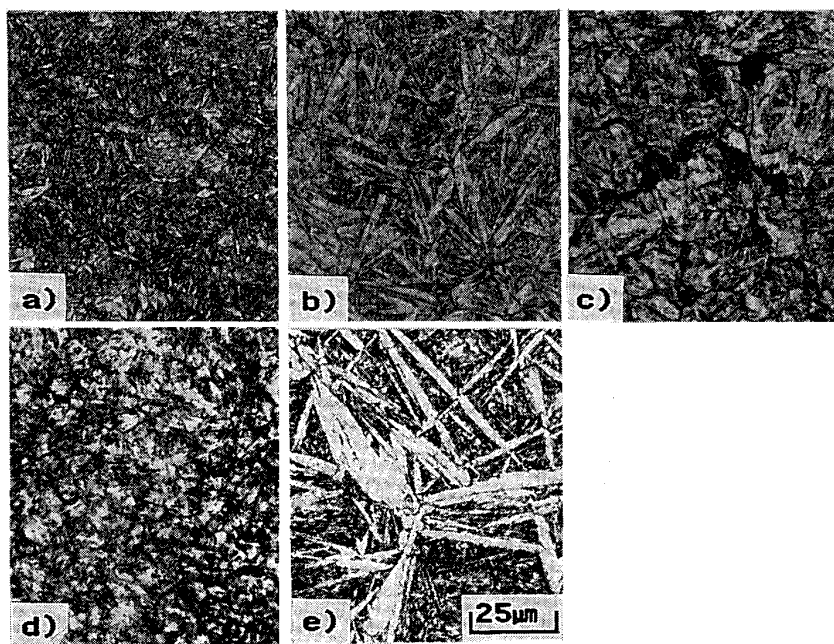
Fig. 8. Variations of calculated value ($\bar{Ch}$) with experimental value (Ch).

ただし $HRC43 \leq H \leq HRC51$, $990^\circ\text{C} \leq T \leq 1050^\circ\text{C}$
 実際の金型の硬度範囲 (HRC43~HRC51) での、式 (5) に H , Ht , T を代入して Ch を逆算して求めた値と実際に実験で求めた値を比較した結果を Fig. 8 に示す。Fig. 8 に示されるように計算値と実験値とは、おおむね一致している。したがって、 H を測定するとともに、BHN (P) 法を用いて、式 (4) から求めた Ht と、さらに、焼入温度 (T) を式 (5) に代入することにより、金型の通常焼入温度範囲 (1015~1035°C) において、 Ch を総合的に推定することができる。

4.2 BHN 信号とミクロ組織およびシャルピー衝撃値の関係

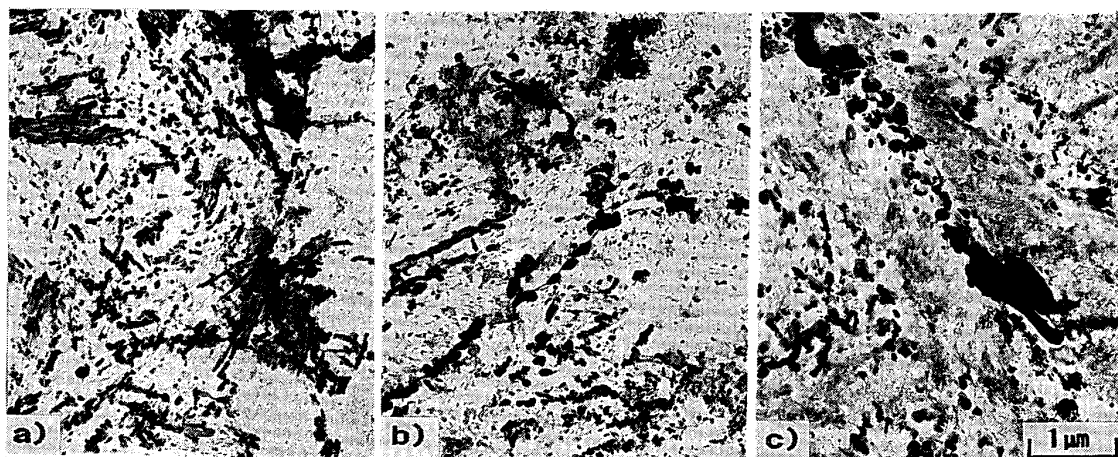
4.2.1 dVp と炭化物形態と Ch の関係

焼入温度、半冷時間の違いにともなう組織変化を特徴的に示すおよそ硬度 HRC47 材の試料の光学顕微鏡組織写真を Photo. 1 に、また、抽出レプリカ写真を Photo. 2, 3 に示す。 $T=1020^\circ\text{C}$ の、 $Ht=3\text{ min}$, 45 min , 110 min 材を比較すると Photo. 1, 2 に示されるように、 Ht の増加にしたがい、析出物の少ない上部針状ベイナイト (B-I 型)²³⁾ が、生成、増加、成長している。また同時に、旧オーステナイト粒界やベイナイト界面に、より凝集粗大化した炭化物が多く析出するとともにその連鎖状化が進行している。さらには、 Ht の増大とともにベイナイトは塊状化し、パーライトも一部生成し、炭化物分布状態は、より不均一化している。また、いずれの Ht 材においても極微細な針状の炭化物が多数析出しており、 Ht の増加とともにやや大きい針状炭化物 (長さ



a) $T = 1020^{\circ}\text{C}$, $Ht = 3$ min, HRC 46.8
 b) $T = 1020^{\circ}\text{C}$, $Ht = 45$ min, HRC 45.7
 c) $T = 1020^{\circ}\text{C}$, $Ht = 110$ min, HRC 48.4
 d) $T = 960^{\circ}\text{C}$, $Ht = 3$ min, HRC 46.9
 e) $T = 1080^{\circ}\text{C}$, $Ht = 45$ min, HRC 47.6
 Austenitized at $T \times 30$ min
 Ht : Half temperature time

Photo. 1. Typical optical micrographs of tempered specimens after quenching from various austenitization temperature and with various cooling rates.



Austenitized at $1020^{\circ}\text{C} \times 30$ min Ht : Half temperature time
 a) $Ht = 3$ min, HRC 46.8 b) $Ht = 45$ min, HRC 45.7 c) $Ht = 110$ min, HRC 48.4

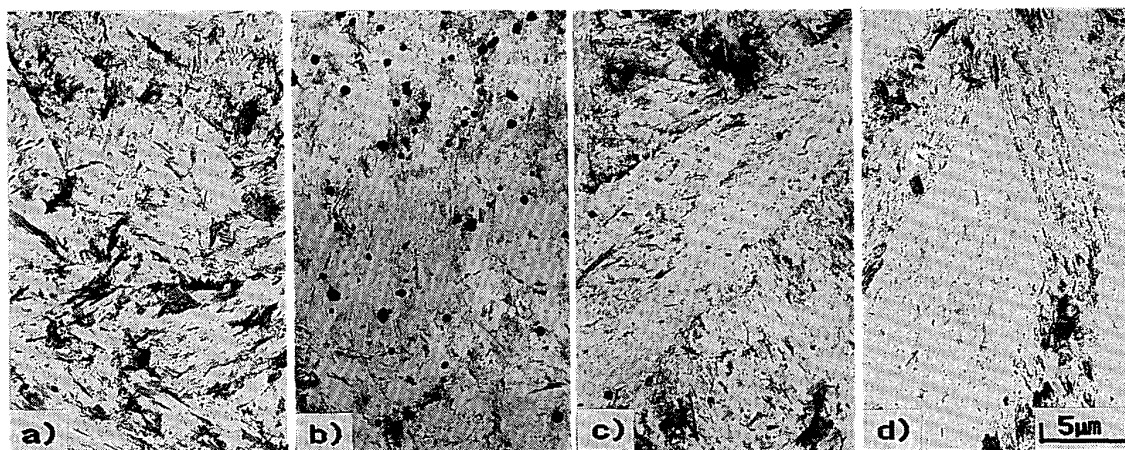
Photo. 2. Typical electron micrographs of extraction replicated carbides of tempered specimens after quenching with various cooling rates.

約 $500 \text{ \AA}$) の数が増加している。一方、 dVp は、Fig. 4 に示されるように、 Ht の増加とともに増加し、 Ch は、Fig. 7 に示されるように低下している。このことは、他の焼入温度から焼き入れられた試料においてもおおむね同様である。

また、 $Ht = 3$ min の $T = 960^{\circ}\text{C}$ 、 1020°C 材を比較すると、Photo. 3 に示されるように、両者とも極微細な炭化物が多数存在し、 $T = 960^{\circ}\text{C}$ 材の方が未溶解炭化物量が大きく、その結果析出炭化物量が減少しているとともに、炭化物分布も不均一化している。一方、 dVp は、焼入温度が低い $T = 960^{\circ}\text{C}$ の方が Fig. 5 に示されるよ

うに大きく、 Ch は、Fig. 7 に示されるように T が低い方が小さい。

また、 $Ht = 45$ min の $T = 1020^{\circ}\text{C}$ 、 1080°C 材を比較すると、Photo. 3 に示されるように $T = 1080^{\circ}\text{C}$ 材の方が、析出炭化物の少ない上部針状ベイナイト (B-I 型)²³⁾ が粗大化しているとともに、粗大化した旧オーステナイト粒界や上部ベイナイト界面に、より凝集粗大化した炭化物が析出し、より不均一な炭化物分布状態になっている。また、両者とも極微細な炭化物が多数存在しているが、その差は顕著でない。一方、 dVp は Fig. 4 に示されるように、 $T = 1080^{\circ}\text{C}$ の方が大きく、 Ch



Austenitized at $T \times 30 \text{ min}$ Ht : Half temperature time
 a) $T = 1020^\circ\text{C}$, $Ht = 3 \text{ min}$, HRC46.8 b) $T = 960^\circ\text{C}$, $Ht = 3 \text{ min}$, HRC46.9
 c) $T = 1020^\circ\text{C}$, $Ht = 45 \text{ min}$, HRC45.7 d) $T = 1080^\circ\text{C}$, $Ht = 45 \text{ min}$, HRC47.6

Photo. 3. Typical electron micrographs of extraction replicated carbides of tempered specimens after quenching from various austenitization temperature.

は Fig. 7 に示されるように、 T が高い方が小さい。

これらの事例はいずれも、極微細な炭化物（円相当径で約 $0.01 \mu\text{m}$ 以下）を除いた炭化物の密度 (N/mm^3) と dVp の関係およびこれらの炭化物の平均粒径 ($\overline{dp}$) と dVp の関係について考えてみると、総じて、 $1/N$ や $\overline{dp}$ が增大すると、あるいは、炭化物分布が不均一化すると、 dVp は増大し Ch は減少することを示している。したがって、極微細な炭化物の dVp に及ぼす影響は小さいと考えられる。このことは、試料のある領域の炭化物密度がある値 (N^*) 以上になると、すなわち、ある領域の平均炭化物粒径 ($\overline{dp}$) がある大きさ (dp^*) 以下になると、磁壁が1個の炭化物のピンニングからはずれて一度に掃く磁区の体積が小さくなりすぎ、この時に生じる BHN 効果を計測することが困難になるためと考えられる。

以上のことより、およそ硬度 HRC47 で一定の場合、 dVp , Ch は未溶解炭化物や析出炭化物の形態（平均炭化物粒径と炭化物密度）および分布状態（均一性）に強く依存していることがわかった。このことは、金型の実用硬度範囲（HRC43～HRC51）で硬度が一定の場合においてもおおむね同じである。

4.2.2 dVp と基地組織の関係

$T = 960^\circ\text{C}$, $Ht = 3 \text{ min}$ および $T = 1020^\circ\text{C}$, $Ht = 110 \text{ min}$ 材を比較すると、Photo. 1 に示されるように前者は焼もどしマルテンサイト組織であるが、後者は塊状ベイナイト+パーライトで、組織が異なっているのに対し、両者の dVp は、Fig. 4 に示されるようにほぼ同じである。あるいは、 $Ht = 3 \text{ min}$ の $T = 960^\circ\text{C}$, 1020°C 材を

比較すると、Photo. 1 に示されるようにともに同じ焼もどしマルテンサイト組織であるのに対し、 dVp は、Fig. 4 に示されるように 960°C の方が大きい。

これらのことから、およそ硬度 HRC47 で一定の場合、 dVp は基地組織そのものには強く依存しないと考えられる。このことは、金型の実用硬度範囲（HRC43～HRC51）で硬度が一定の場合においてもおおむね同様である。

4.2.3 Vp と平均炭化物粒径 ($\overline{dp}$) や炭化物密度 (N) との関係

HRB88.5～HRC37 における試料をもちいて、 Vp と $0.04 \mu\text{m}$ 以上の炭化物の $\overline{dp}$ や N との定量的な関係を調べた結果を Fig. 9, 10 に示す。これらの関係は、上述した dVp と $\overline{dp}$ や N との定性的な関係と同じである。また、これらの関係は、Fig. 9, 10 に併せて示されるように、著者らがすでに報告した HRB88.5～HRC28.2 の範囲における試料の Vp と $0.12 \mu\text{m}$ 以上の炭化物の $\overline{dp}$ や N の定量的な関係¹⁵⁾とも同じである。また、 Vp と $(\overline{dp})^2$ の関係は、ともに正比例関係にあり、坂本らの BHN の実効値 RMS と $(\overline{dp})^2$ の関係¹⁰⁾¹¹⁾と同じである。従って、 Vp は、坂本ら¹⁰⁾¹¹⁾が述べているように炭化物形態に強く依存し、 $1/\overline{dp}$ と N が増加すると、単位時間当たりのガウシアンパルス（BHN パルス）総数が増加し、パルスがより多く重なり合うために、減少したものと推定される。また、同じ $\overline{dp}$ や N でも、炭化物が均一に分布している方が、不均一に分布しているよりも、より同程度の強度のガウシアンパルスが均一に発生し、より均一に重なり合うために、 Vp は小さくなったと思

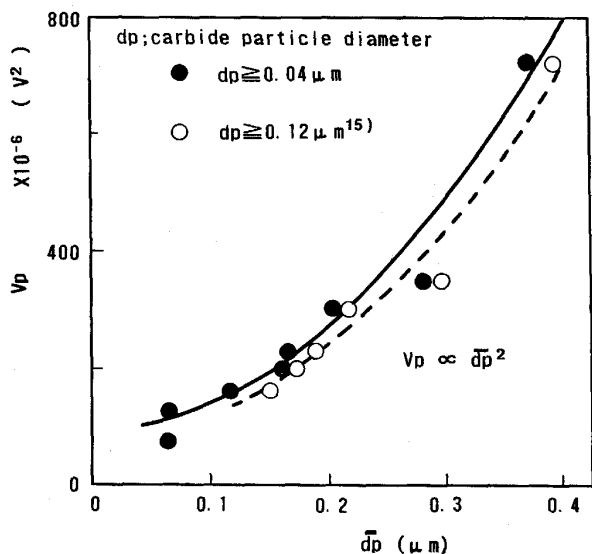


Fig. 9. Variations of BHN parameter (V_p) with the mean value of carbide particle diameter ($\bar{d}_p$).

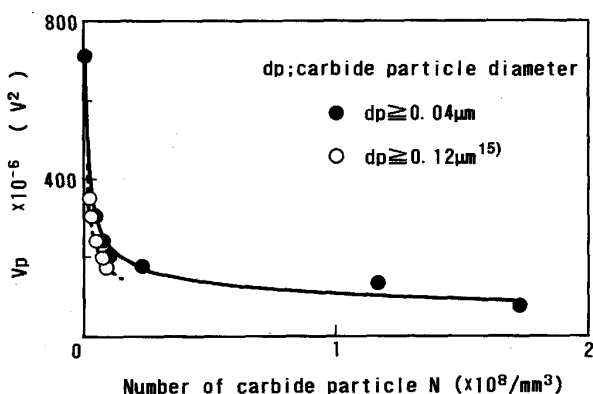


Fig. 10. Variations of BHN parameter (V_p) with the number of carbide particles per unit volume (N).

われる。

5. 結 論

0.4C-5Cr-Mo-V 熱間工具鋼の焼入れ焼もどし材を用いて、磁化過程で発生する全バルクハウゼンノイズ信号のエネルギーの総和 (V_p) をパラメーターとして求めることにより、通常の焼入温度範囲 ($1015^\circ\text{C} \sim 1035^\circ\text{C}$) の任意の温度に設定された場合の焼入れ半冷時間 (H_t) を非破壊評価できることがわかった。また、硬度を測定し、 V_p と併用することにより、このような場合のシャ

ルピー衝撃値も総合的に推定できることがわかった。

また、 V_p は、実際の金型の硬度範囲である HRC43 から HRC51 において、硬度が一定の場合、基地組織そのものよりも、これらに関連した未溶解炭化物や析出炭化物の形態 (平均炭化物粒径と炭化物密度) および分布状態により強く依存していることがわかった。

終わりに、本研究を実施するにあたり、適切な助言を賜った秋田工業高等専門学校校長島田平八東北大学名誉教授、および東北大学材料物性学科本間基文教授に深く感謝いたします。また実験およびデータの整理に関しては、東北大学工学部材料加工学科高橋忠雄技官、および大学院生 (現: 豊田中央研究所(株)) 伊藤勇一氏、四年生 (現: (株) 神戸製鋼所) 中川修志氏、(現: 川崎重工業(株)) 長谷部諭に負うところが大きかったことを記し、謝意を表します。

文 献

- 1) 中居則彦, 小幡充男: 鉄と鋼, **75** (1989), p. 833
- 2) R. L. PASLEY: Material Evaluation, **28** (1970), p. 1527
- 3) J. KAMEDA and R. RANJAN: Acta Metall., **35** (1987), p. 1515
- 4) J. KAMEDA and R. RANJAN: Acta Metall., **35** (1987), p. 1527
- 5) P. DEIMEL, D. KUPPLER, K. HERZ and W. A. THEINER: J. Mag. Mag. Mater., **36** (1983), p. 277
- 6) 古屋泰文, 島田平八: 非破壊検査, **35** (1986), p. 532
- 7) 古屋泰文, 島田平八: 日本金属学会誌, **52** (1988), p. 267
- 8) R. RANJAN, D. C. JILES, O. BUCK and R. B. THOMPSON: J. Appl. Phys., **61** (1987), p. 3199
- 9) 柴田 守, 佐々木弘明: 非破壊検査, **36** (1987), p. 772
- 10) H. SAKAMOTO, M. OKADA and M. HOMMA: IEEE Trans. Mag., **MAG-23** (1987), p. 2236
- 11) 坂本広明: 東北大学学位論文 (1985)
- 12) D. J. BUTTLE, C. B. SCRUBY, J. P. JAKUBOVICS and G. A. D. BRIGGS: Philosophical Magazine A, **55** (1987), p. 717
- 13) D. J. BUTTLE, J. P. JAKUBOVICS and G. A. D. BRIGGS: Philosophical Magazine A, **55** (1987), p. 735
- 14) 小幡充男, 伊藤勇一, 古屋泰文, 飯島活巳, 福井 寛: 日本機械学会誌 A 編, **56** (1990), p. 1677
- 15) N. NAKAI, Y. FURUYA and M. OBATA: Materials Trans. JIM, **30** (1989), p. 197
- 16) 西村富隆: 精密機械, **46** (1980), p. 1225
- 17) 西村富隆: 熱処理, **18** (1978), p. 163
- 18) 上原紀興, 並木邦夫, 高橋国男: 電気製鋼, **52** (1981), p. 165
- 19) 奥野利夫: 鉄と鋼, **69** (1983), p. 655
- 20) 奥野利夫: 鉄と鋼, **69** (1983), p. 1676
- 21) T. OKUNO: Trans. Iron Steel Inst. Jpn., **27** (1987), p. 51
- 22) 相沢 力: 電気製鋼, **57** (1986), p. 214
- 23) 邦武立郎, 寺崎久長, 大森靖也, 大谷泰夫: Toward Improved Ductility and Toughness, Kyoto (1971 年 10 月), p. 83