

バルクハウゼンノイズ解析による 0.4 C-5 Cr-Mo-V 熱間工具鋼の焼入冷却速度の推定および靱性の非破壊評価

中 居 則 彦*・小 幡 充 男*²

Non-destructive Cooling Rate Evaluation of 0.4 C-5 Cr-Mo-V Hot-work Tool Steel by Barkhausen Noise Analysis

Norihiko NAKAI and Mitsuo OBATA

Synopsis :

The purpose of this paper is to develop a non-destructive method for evaluating cooling-rates (time for cooling from austenitizing temperature to 500°C (Ht)) from 0.4C-5Cr-Mo-V hot-work tool steel specimens after tempering procedure. For this, the authors tried to employ Barkhausen noise (BHN) signals which were induced during magnetization process. The BHN signals were measured on surfaces of specimens which were cooled with various Ht and were tempered to adjust hardness (H). The experimental results indicated that two BHN parameters, the total energy (Vp) and the maximum output (Vh) of BHN signals were strongly related with microstructure which changed depending on Ht . These relationships could be successfully summarized as experimental expressions, $Ht = f(H, Vp)$ and $Ht = f(H, Vh)$. These results made it clear that non-destructive evaluation of Ht could be achieved by using a hybrid method combining the BHN method with an ordinary hardness test. Then in this paper, the authors confirmed the possibility of estimation of charpy impact values (Ch) through the relationship between Ht, H and Ch .

Key words : non-destructive evaluation ; hot-work tool steel ; barkhausen noise ; cooling rate ; toughness ; hardness.

1. 緒 言

0.4 C-5 Cr-Mo-V 熱間工具鋼は、熱間汎用金型材として広く用いられている。本鋼を用いた金型の熱処理は、熱処理変形と割れ防止を考慮しながら、所期の金型設計寿命が達成できる硬度 (H) と靱性 (シャルピー衝撃値 (Ch)) を確保することを目指し実施されている。しかし、現在の熱処理温度の制御は、炉内雰囲気温度を熱電対でモニタリングしながら行われているだけであり、金型寸法の大型化等による、金型焼入冷却速度の低下などを正確に把握できない。このため、かならずしも目的の硬度と靱性が達成できず、ときとして靱性不足により使用初期に大きな割れを引き起こし¹⁾²⁾ 問題となっている。このような問題を解決するためには、熱処理後の各金型において、硬度と靱性を非破壊評価できる方法が確立される必要がある。ところが、現在のところ硬度

は評価されているものの、靱性についてはその方法がないため、非破壊評価されていないのが現状である³⁾。

もし、各金型の靱性を非破壊評価できるようになれば、大きな割れを起こさない所期の靱性を確保しながら、最高寿命が期待できる最適な焼もどし硬度を指示することができることはもちろんのこと、これらの結果をふまえながら、最適な金型使用条件を設定することもでき、金型の品質保証および高寿命化を前進させることができる。

金型の靱性と熱処理に関する従来の研究によれば、靱性は硬度と焼入冷却速度に影響される^{4)~8)} ことが知られている。したがって、金型の硬度を測定するとともに焼入冷却速度をも非破壊評価することができれば、金型の靱性の非破壊評価法を実現することが可能になるものと考えられる。

以上の観点から、本論文では、金型の靱性の非破壊評

昭和 63 年 8 月 15 日受付 (Received Aug. 15, 1988)

* 日本高周波鋼業(株) (Nippon Koshuha Steel Co., Ltd., 3-10-15 Hachimanmachi Shinminato Toyama pref. 934)

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

価法の基礎研究として、0.4 C-5 Cr-Mo-V 熱間工具鋼の焼入焼もどし材をもちいて、焼入冷却速度を非破壊評価する方法の検討を行った。その方法としては、熱処理終了後の金型より直接焼入冷却速度を測定することは不可能であるので、焼入冷却速度に応じて変化する金型の組織変化を通して、焼入冷却速度を評価する方法を試みた。そのための方法として、金型の組織変化を敏感に検出できかつ、非破壊的な方法であるバルクハウゼンノイズ (BHN) 法^{9)~19)}に着目した。その結果、焼入冷却速度を十分評価できることが確認され、また、硬度測定とこの評価法を併用することにより靱性 (シャルピー衝撃値) の推定も可能であることがわかった。

2. 試験片

2.1 供試材

供試材は 0.4 C-5 Cr-Mo-V 鋼で、化学成分を Table 1 に示す。アーク式電気炉で溶製し、鍛錬成形比 6 以上に、素材断面寸法 250 mm × 400 mm に熱間成形後、860°C で焼なまし処理をした。試験片採取位置は、中心と隅角との中間位置で、鍛伸方向に採取し、実験に供した。

2.2 試験片の形状と熱処理

BHN 試験片とシャルピー試験片を準備した。BHN 試験片の寸法は 3 mm × 24 mm × 62 mm で、熱処理後表面荒さを研磨紙 320 番で仕上げた。シャルピー衝撃試験片は、JIS 3 号試験片を用いた。

Table 1. Chemical composition of specimen (wt%).

C	Si	Mn	Cr	Mo	V
0.38	0.92	0.41	5.25	1.07	0.51

試験片の熱処理は、次のように実施した。まず、各試験片を 1020°C で 30 min 保持してオーステナイト化処理を行った後、半冷時間[†] (Ht) を、 $Ht = 3, 15, 45, 110$ min の四段階に選び冷却し、その後二回焼もどしを行った。試料の CCT 曲線と試験片の焼入冷却曲線を Fig. 1 に示す。1回目の焼もどしは、580°C で 90 min 保持後空冷とし、2回目は、焼もどし硬度が HRC 36 から HRC 52 になるように、保持時間を 90 min とし、温度を 560°C ~ 655°C の間で調整して実施した。

このように熱処理された試験片の代表的な光学顕微鏡組織写真を Photo. 1 に示す。 $Ht = 3$ min の材料ではラ

[†] オーステナイト化温度 1020°C から 500°C までの冷却時間

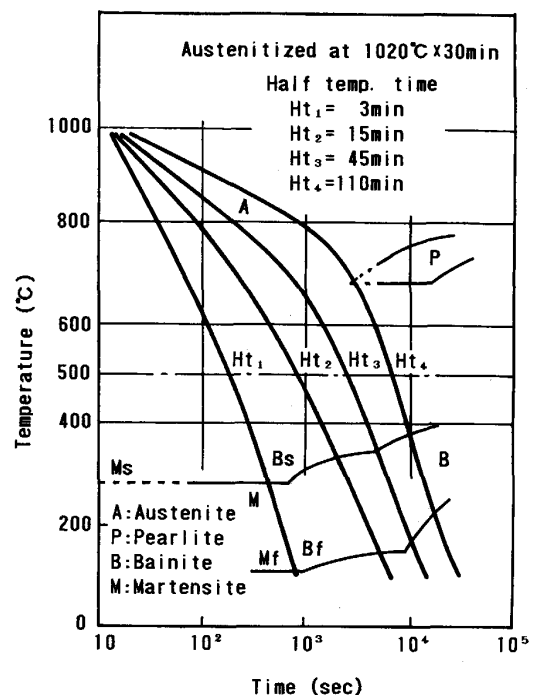
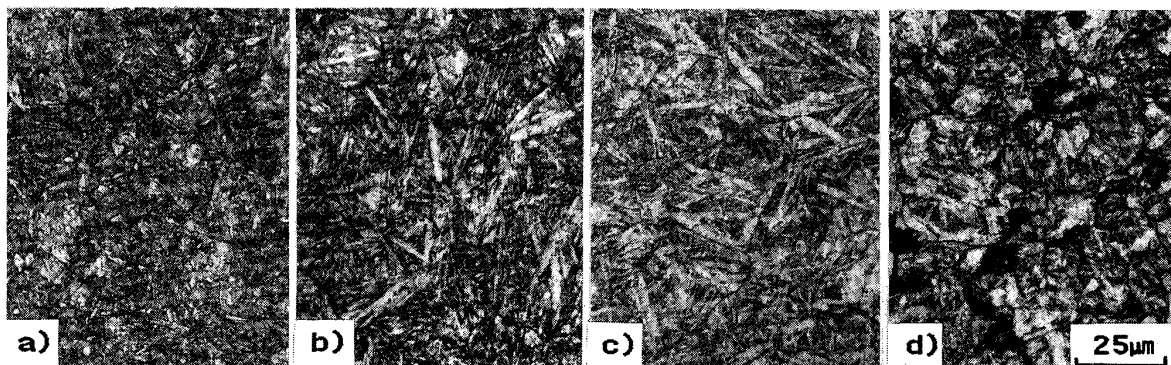


Fig. 1. Continuous cooling transformation diagram.



Austenitized at 1020°C × 30 min, Ht : Half temperature time

a) Ht 3 min, HRC 46.8 b) Ht 15 min, HRC 47.0

c) Ht 45 min, HRC 45.7 d) Ht 110 min, HRC 48.4

Photo. 1. Typical optical micrographs of specimens quenched at various cooling rates and tempered.

ス状マルテンサイト組織で、 $H_t = 15 \text{ min}$ 材は、針状のベイナイト組織が部分的に生じており、 $H_t = 45 \text{ min}$ 材では、針状ベイナイト組織の占める割合が増えている。また、 $H_t = 110 \text{ min}$ 材では、パーライトがわずかに生成し、ベイナイトは塊状化している。

3. BHN 信号測定装置と解析方法

3.1 BHN 信号測定装置と磁化条件

BHN 測定装置の構成を Fig. 2 に示す。試料の磁化は、コイルを 600 回巻いた Mn-Zn フェライトコアを用いて、Table 2 に示す磁化条件で実施した。なお、BHN の磁化電圧依存性を検討するために、各試験片ごとに最大磁化電圧 (V_m) を五段階に変えている。磁化により生じた誘導起電圧をパーマロイ磁気ヘッドの検出コアにより検出し、増幅器にて増幅後、ハイパスフィルターにより、700 Hz 以下の低周波成分を除去することで BHN 信号だけを抽出し、スペクトラムアナライザーで解析した。なお、スペクトラムアナライザーのサンプリング数

Table 2. Conditions of magnetization.

Magnetization frequency	1 Hz
Magnetization voltage wave	Triangular wave
Maximum magnetization voltage	0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3 V

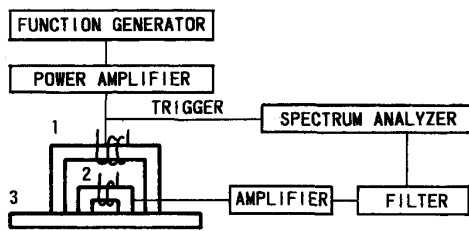


Fig. 2. Block diagram of measurement and analysis apparatus of Barkhausen noise (BHN) signals.

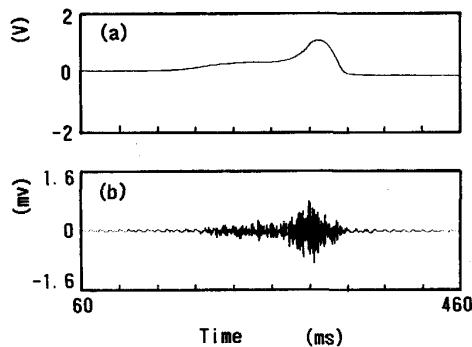


Fig. 3. Induced voltage-time curve (a) and Barkhausen noises (BHN) signals (b).

は、1024 個である。時間軸上での誘導起電圧波形と BHN 信号の例を、それぞれ Fig. 3 (a) と Fig. 3 (b) に示す。

本試料の BHN 信号をあらかじめ詳細にスペクトラム解析した結果、スペクトラムの変化の大きい周波数領域は、10 kHz までであることが確認されたことから、解析周波数は 10 kHz までとした。この場合、スペクトラムアナライザー (Fig. 2) の容量より、一度にスペクトラム解析できる測定時間長は、およそ 40 ms である。

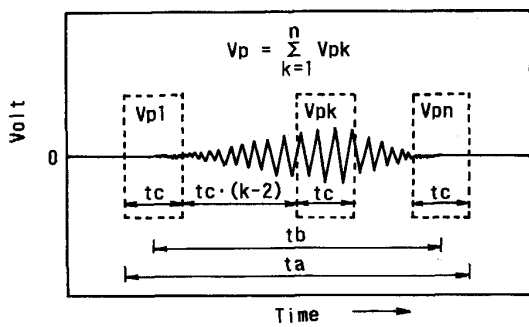
3.2 BHN 信号解析方法

本研究目的を遂行するためには、Fig. 3 (b) に例示される BHN 信号を解析し、試料の組織変化に依存して変化する BHN パラメーターを求めることが必要である。材質評価のための BHN パラメーターとしては、従来より、いくつか提案されてきている。その代表的なものとしては、BHN 信号のエネルギーあるいは最大瞬間出力値を基礎とするパラメーターである。しかし、BHN 発生機構と組織との関係は、まだ十分には解明されていないため、本研究のような、マトリックス組織と析出炭化物の種類、形態および大きさが変化する材料を評価するためには、いずれのパラメーターを用いるべきかは、実験的に検討する必要がある。そこで、以下の二つの解析方法を検討した。なお、本研究では、BHN 信号のエネルギーを基礎とする解析方法を BHN (P) 法、また、最大瞬間出力値を基礎とする解析方法を BHN (A) 法と呼ぶことにする。

3.2.1 BHN (P) 法

従来の BHN 信号のエネルギーを基礎とするパラメーターとしては、BHN 信号の平均エネルギーである実効値電圧 (RMS (Route Mean Square)) が提案されている¹⁸⁾¹⁹⁾。この RMS を求めるためには、平均化する時間範囲を定める必要がある。しかし、本研究で用いた試料において、BHN 発生時間範囲は、磁化条件や材質に依存して変化するため、RMS を求める際の平均化時間範囲の取り方が統一できず、異なる条件や材質におけるデータを相互比較する上で問題である。そこで、これを避けるために、時間平均を取らず、磁化過程で発生する全 BHN 信号のエネルギーの総和 (V_p) をパラメーターとして採用することにした。

さて、本研究においては、Table 2 に示すように 1 Hz で磁化されているが、BHN 信号はその全範囲で発生するのではなく、Fig. 3 (b) に示されるように途中のある範囲 (約 100 ~ 200 ms) で集中的に発生する。一方、3.1 節で述べたように、BHN 信号のスペクトラムの 10 kHz までの変化を一度に測定できる時間長 (t_c) は、約



t_a : Total measurement time length
 t_b : Generating time length of BHN signals in t_a
 t_c : Each input time length
 V_{pk} : Power of BHN signals in t_c
 V_p : Total energy of BHN signals in t_a

Fig. 4. Process for total energy of BHN signals (V_p).

40 ms であるため、100 ~ 200 ms の時間範囲で持続する全 BHN 信号を一度に解析することは不可能である。そこで、本研究では BHN 信号の 10 kHz 以内のエネルギーの総和 (V_p) を、Fig. 4 に示すようにして求めた。すなわち、BHN 信号を t_c (40 ms) 間隔に分割して測定し、それぞれのパワースペクトラムのパワー値 (V_{pk}) を求め、それらを合計して V_p とした。各分割区間における V_{pk} は、誤差を小さくするためそれぞれ 50 回の平均値をとった。

3.2.2 BHN (A) 法

次に BHN (A) 法について説明する。最大瞬間出力値をパラメーターとする材質評価の例としては、KAMEDA ら¹¹⁾¹²⁾の報告がある。KAMEDA らは、BHN 信号を 50 回測定し、各測定ごとに BHN 最大瞬間出力値を求め、その平均値を BHN 最大瞬間出力値 (V_h) とした。この方法により、本研究で用いた試料の V_h を実際に求めてみると、最大瞬間出力を発生するタイミングが各測定ごとに異なるため、それらの平均値がどのような意味を持つのか疑問であるとともに、再現性も悪く問題があった。そこで、本研究では、 V_h を次のようにして求めた。すなわち、まず、Fig. 3 (b) に示すように、BHN 信号全体を粗いサンプリング間隔にてモニタリングし、BHN 信号の最大出力を示すおおよそのタイミングを確認した後、このタイミングが測定時間範囲のほぼ中央になるようにスペクトラムアナライザーの時間軸を調整する。続いて、サンプリング間隔を 10 kHz 解析レベルに設定し、この状態で繰り返し測定した後、時間軸上の 1024 個の各サンプル点における測定値の最大値をプロットし、BHN 信号の出力上限波形を得る。以後本研

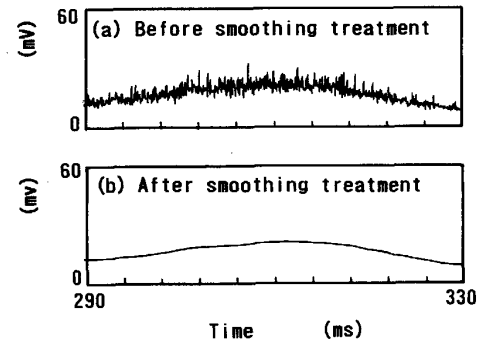


Fig. 5. Variations of maximum output of BHN signals with time.

究では、この波形を BHN ピークホールド波形と呼ぶことにする。その例を Fig. 5 (a) に示す。なお、繰返しは、この波形が安定化するまで約 300 回実施した。Fig. 5 (a) は、まだ、スパイク状の波形をしており、この波形の最大値を BHN 最大瞬間出力として採用することはできない。そこで、この波形を統計的な処理により平滑化処理し (Fig. 5 (b))、その波形の最大値を V_h として採用した。この方法によれば、同一試料であれば常に同じタイミングで最大瞬間出力が現れるとともに、その値も再現性がよいことが確認された。

4. 実験結果

4.1 BHN (P) 法を用いた半冷時間の非破壊評価

BHN (P) 法により求めた半冷時間 (H_t) 3 min, 45 min 材の V_p と最大磁化電圧 (V_m) との関係をそれぞれ Fig. 6 (a), (b) に示す。 V_p は、 V_m の増加とともに急激に増加し、飽和磁化状態近傍で最大値を示した後、直線的に緩やかに低下している。その低下は、 H_t が大きいほど、また硬度 (H) が低いほど大きくなる傾向を示している。このように V_p は V_m 依存性があり、測定値を相互比較する場合は、同一 V_m の V_p を用いる必要があることがわかった。そこで、本研究では、飽和磁化電圧以上での V_p が V_m と線形的に変化することを逆に利用し、次のような方法で V_m を統一することを試みた。すなわち、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 の代表量として用いることにした。こうして求めた V_p^* は、仮想的な値ではあるが、複数の V_p から決定されるパラメーターであることから、単独の V_m における V_p を用いるよりも誤差が小さく、かつ再現性の点で優れている。

次に、 V_p^* の測定装置依存性を軽減するために、式 (3-1) により V_p を規格化し、 H_t 評価のパラメーター

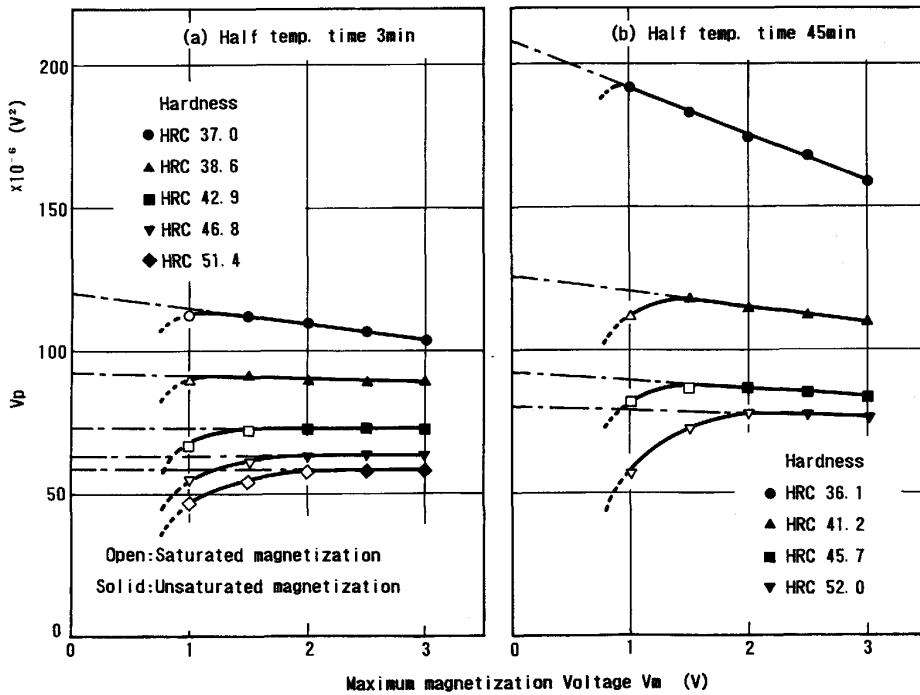


Fig. 6. Variations of BHN parameter (V_p) with maximum magnetizing voltage (V_m) and hardness.

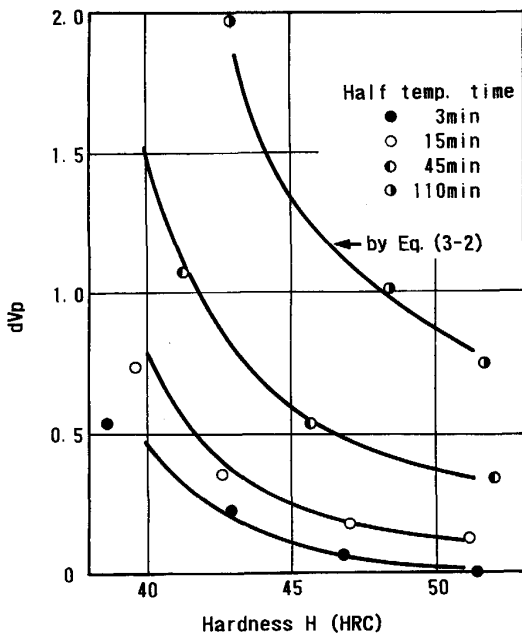


Fig. 7. Variations of BHN parameter (dV_p) with hardness and half temperature time (Solid lines are calculated by eq. (3-2)).

とした。

$$dV_p = (V_{p_i}^* - A) / (B - A) \dots \dots \dots (3-1)$$

ここで A ; $H_t=3 \text{ min}$, $H=\text{HRC } 51.4$ 材での V_p^*

B ; $H_t=3 \text{ min}$, $H=\text{HRC } 37$ 材での V_p^*

$V_{p_i}^*$; 各試料の V_p^*

なお, A, B は任意の試料の V_p^* を選ぶことができる。

こうして求めた dV_p と H の関係を Fig. 7 に示す。いずれの試料においても, H が低いほど, また H_t が大きいほど, dV_p は大きい値を示している。

Fig. 7 の H_t と dV_p および H の関係式を最小自乗法により誘導すると次のようになった。

$$H_t = \alpha_1 + \beta_1 \cdot dV_p \dots \dots \dots (3-2)$$

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

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

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

なお, 式 (3-1) において, dV_p をいずれの試料の V_p を用いて規格化して求めても, 式 (3-2) の α_1, β_1 は, H の二次式の形に表される。ただし, 式の係数は変化する。

式 (3-2) に, H_t と H を代入して dV_p を逆に計算してみると Fig. 7 内の実線のようになった。実際の金型の硬度範囲である $\text{HRC } 43$ から $\text{HRC } 51$ では, 計算値と実験値とがよく一致している。したがって, 半冷時間 (H_t) は, BHN (P) 法により V_p^* を求めた後硬度 (H) とともに式 (3-1), (3-2) に代入することにより, 評価することができる。

4.2 BHN (A) 法を用いた半冷時間の非破壊評価

BHN (A) 法により求めた半冷時間 (H_t) 3 min, 45 min 材の V_h と最大磁化電圧 (V_m) との関係を Fig. 8 (a), (b) に示す。 V_h は, 各硬度において V_m の増加とともに, 非線形的にかつ単調に増加し, 先の V_p と V_m の関係 (Fig. 6 (a), (b)) とはまったく異なった

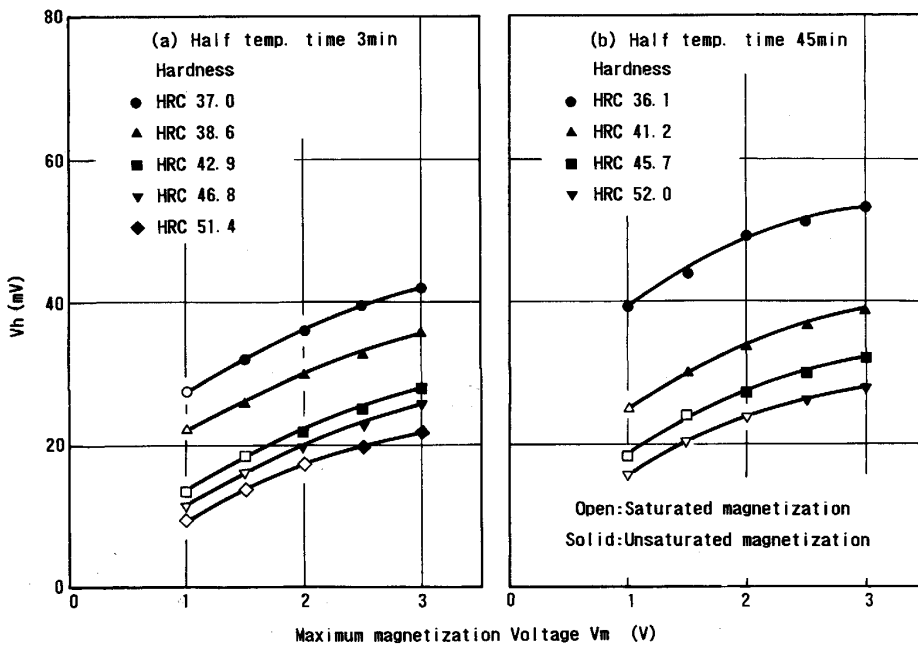


Fig. 8. Variations of BHN parameter (V_h) with maximum magnetizing voltage (V_m) and hardness.

V_m 依存性を示した。

次に V_p の場合と同様に V_m に依存しない形で V_h を整理することを検討した。そのため、まず、Fig. 8 (a), (b) で示される各 $V_h - V_m$ 曲線を比較した結果、各曲線は硬度の変化により単に V_h 軸方向に平行移動していることが確認され、任意の $V_h - V_m$ 曲線間の差は、 V_m に依存せず一定であることがわかった。そこで、本研究では、ある基準材と各試料の $V_h - V_m$ 曲線の平行移動量 (dV_h) を式 (3-3) の形で求めることにより、 V_h の V_m 依存性を消去した。

$$dV_h^* = \sum_{k=1}^n (V_{h_{iK}} - V_{h_{oK}}) / n \quad (3-3)$$

ここで n ; 測定 V_m の数 (=5)

$V_{h_{oK}}$; K 番目 V_m における基準材の V_h

$V_{h_{iK}}$; K 番目 V_m における試料の V_h

なお、基準材としては、任意の試料をもちいることができるがここでは、 $Ht=3 \text{ min}$, $H=\text{HRC } 51.4$ 材を用いた。また dV_h^* の測定装置依存性を、式 (3-4) 中 D で示されるある試料の dV_h^* で規格化することで除去した。

$$dV_h = dV_h^* / D \quad (3-4)$$

なお、 D は任意の試料の dV_h^* を選ぶことができるが、本研究では、 $Ht=3 \text{ min}$, $H=\text{HRC } 37$ 材の dV_h^* を用いた。こうして求めた、 dV_h と硬度の関係を Fig. 9 に示す。いずれの試料においても、硬度が低いほどまた Ht が大きいほど dV_h は大きい値を示している。

次に、Fig. 9 の Ht (min) と dV_h および H (HRC) の関係式を最小自乗法により誘導すると次のように示された。

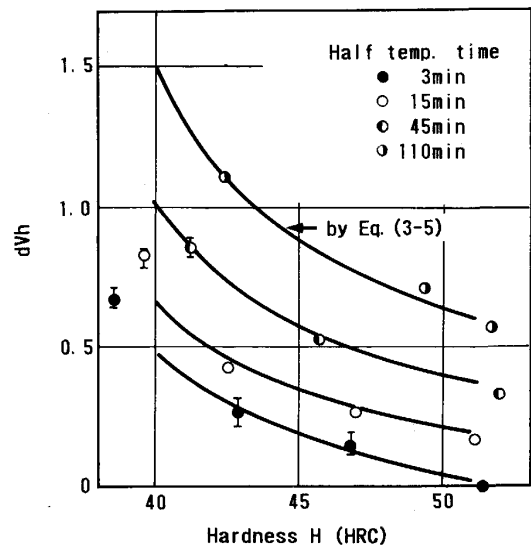


Fig. 9. Variations of BHN parameter (dV_h) with hardness and half temperature time (Solid lines are calculated by eq. (3-5)).

$$Ht = \alpha_2 + \beta_2 \cdot (dV_h^*)^2 \quad (3-5)$$

$$\alpha_2 = -58.2 + 1.30 \cdot H - 0.00172 \cdot H^2$$

$$\beta_2 = 392 - 32.2 \cdot H + 0.593 \cdot H^2$$

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

なお、 α_2 , β_2 は、基準材の V_h と D の取り方に依存せず H の二次式の形で示される。ただし、係数は変化する。式 (3-5) の関係から求まる各硬度における Ht と dV_h の関係を Fig. 9 に実線で示す。両者は、実用的な硬度範囲 ($\text{HRC } 43 \sim \text{HRC } 51$) において、よく一致している。したがって、 Ht (min) は V_h と H (HRC) を求め、式

(3-3), (3-4), (3-5) に代入することにより求めることができることがわかった。

5. 考 察

0.4 C-5 Cr-Mo-V 鋼の焼入焼もどし材の半冷時間 (Ht) は, BHN (P) 法または BHN (A) 法により, 非破壊的に評価できることがわかった。さて, 本材料のシャルピー衝撃値 (Ch) は, 硬度 (H) と半冷時間 (Ht) に影響される^{4)~6)}。したがって, あらかじめ各 H における Ch と Ht の関係を詳細に求めておけば, H を測定するとともに, BHN (P) 法あるいは BHN (A) 法を併用することにより, 試料の Ch を推定することが可能となると思われる。次にこのような考えに基づく Ch の非破壊的推定法を検討する。また, BHN 信号を解析して得られた二つのパラメーター (Vp あるいは Vh) と組織の関係を定性的に考察する。

5.1 シャルピー衝撃値の推定

まず, 本研究における試料を用い Ch と H および Ht の三者の関係をシャルピー試験により求めると, Fig. 10 のようになった。 Ch は, 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 Ch が低下している。これら三者の関係を表す実験式を最小自乗法により求めると, 次のようになる。

$$Ch = 17.3 - 1.11 \cdot \log(Ht) + (-0.266 + 0.0108 \cdot \log(Ht)) \cdot H \dots\dots\dots (4-1)$$

HRC 43 < H < HRC 51

式 (4-1) に H と Ht を代入して Ch を逆算してみると

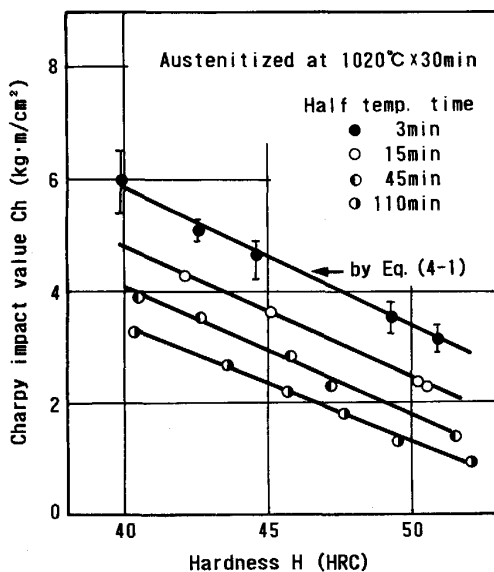


Fig. 10. Variations of charpy impact value with hardness and half temperature time (Solid lines are calculated by eq. (4-1)).

Fig. 10 に実線で示すようであり, 実際の金型の硬度範囲である HRC 43 ~ HRC 51 では, 式 (4-1) と実験値とが, よく一致していることがわかる。したがって, H を測定するとともに, BHN (P) 法あるいは BHN (H) 法を用いて, それぞれ式 (3-2) あるいは式 (3-5) から Ht を求め, H と Ht を式 (4-1) に代入することにより, Ch を推定することができることになる。なお, Ch , H および Ht の関係を実験式で表せない場合は, 三者の関係をプロットした図を用いた図式解法を用いればよい。

これまで述べたように BHN (P) 法および BHN (A) 法いずれの方法をもちいてもシャルピー値を推定することができることがわかった。これら二つの方法はそれぞれ BHN 信号の異なった情報量を基礎とする解析方法であり, また, 両者の方法で推定した Ch に差異がないことから, 一つの方法でシャルピー値を推定する場合より, 二つの方法で推定する方が, 信頼性は向上すると考えられる。

5.2 BHN 信号と組織の関係

5.2.1 Vp と組織との関係

坂本ら¹⁸⁾¹⁹⁾ は球状化セメント組織において, セメント平均粒径 (dp) と BHN の実効値 (RMS) の関係について, 理論および実験にて解析し, RMS は dp^2 に依存することを示している。

さて, 本論文で BHN (P) 法で求めた Vp は, RMS 同様 BHN 信号のエネルギーを基礎とするパラメーターであることから, RMS と同様炭化物の平均粒径 (dp) に依存すると考えられる。

しかし, 本試料は, 複数の種類の微細な炭化物が析出しており, 各炭化物の dp を定量化することは困難であった。そこで, BHN は析出炭化物の種類によらず大きさだけに依存すると考え, 定性的に Vp と dp の関係を考察してみた。すなわち, Fig. 6 (a), (b) に示されるように Vp は, H が低いほどまた Ht が大きいほど, 大きい傾向を示している。一方, H が低いほど析出炭化物の凝集粗大化が進行し, また, Ht が大きいほど, Photo. 1 に示すように, ベイナイト粒界や前オーステナイト粒界等に凝集粗大化しやすい炭化物が多く析出していると考えられるため, dp は大きいものと推定される。したがって, dp が大きくなるにつれ, Vp も増大するものと判断される。

5.2.2 Vh と組織との関係

Fig. 8 (a), (b) で示す Vh と H および Ht との関係は, Vp の場合と同様, H が低いほどまた, Ht が大きいほど Vh が大きい。したがって, このことは, dp と Vp

の関係と同様、 dp が大きくなると Vh が大きくなることを示唆していると考えられる。

さて、これまで述べてきた BHN (P) 法および BHN (H) 法は、成分および焼入温度が一定の場合についてであり、それらが変わると、推定する材料の実際の H と H_i が同じでも炭化物の分布状態や結晶粒径が変わることから、 Vp および Vh は変わり、その結果、これらの方法により推定した H_i は異なると思われる。したがって、これら二つの方法が、成分および焼入温度が変わった時どの程度まで有効であるかは今後の研究課題であり、このことは、炭化物の分布状態や結晶粒径等の磁化過程 (逆磁区の発生と磁壁の移動) におよぼす影響を把握することにより明らかにすることができるものと考えられる。

6. 結 論

0.4 C-5 Cr-Mo-V 熱間工具鋼の焼入焼もどし材を用いて、バルクハウゼンノイズ (BHN) 信号を解析することにより、焼入半冷時間 (H_i) を非破壊評価できる二つのパラメーターを提案した。一つは、飽和磁化状態で発生する全 BHN 信号のエネルギーの総和 (Vp) を基礎とするものであり、もう一つは、BHN 瞬間最大出力値 (Vh) を用いるものである。また、硬度を測定し、 Vp もしくは Vh と併用することにより、シャルピー衝撃値を推定できることがわかった。

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教授に及び東

北大学・材料物性学科本間基文教授に感謝いたします。また実験に協力していただいた大学院生伊藤勇一氏 (現豊田中央研究所株式会社) に感謝いたします。

文 献

- 1) 吉谷 悟: 電気製鋼, 57 (1986), p. 222
- 2) 相沢 力: 特殊鋼, 37 (1988) 1, p. 70
- 3) 大野博久, 松本忠博: 熱処理, 28 (1988), p. 26
- 4) 西村富隆: 精密機械, 46 (1980), p. 1225
- 5) 上原紀興, 並木邦夫, 高橋国男: 電気製鋼, 52 (1981), p. 165
- 6) 奥野利夫: 鉄と鋼, 69 (1983), p. 655
- 7) 奥野利夫: 鉄と鋼, 69 (1983), p. 1676
- 8) T. OKUNO: Trans. Iron steel Inst. Jpn., 27 (1987), p. 51
- 9) 相沢 力: 電気製鋼, 57 (1986), p. 214
- 10) R. L. PASLEY: Material Evaluation, 28 (1970), p. 157
- 11) J. KAMEDA and R. RANJAN: Acta Metall., 35 (1987), p. 1515
- 12) J. KAMEDA and R. RANJAN: Acta Metall., 35 (1987), p. 1527
- 13) P. DEIMEL, D. KUPPLER, K. HERZ and W. A. THEINER: J. Mag. Mag. Mater., 36 (1983), p. 277
- 14) 古屋泰文, 島田平八: 非破壊検査, 35 (1986), p. 532
- 15) 古屋泰文, 島田平八: 日本金属学会誌, 52 (1988), p. 267
- 16) R. RANJAN, D. C. JILES, O. BUCK and R. B. THOMPSON: J. Appl. Phys., 61 (1987), p. 3199
- 17) 柴田 守, 佐々木弘明: 非破壊検査, 36 (1987), p. 772
- 18) H. SAKAMOTO, M. OKADA and M. HOMMA: IEEE Trans. Mag., 23 (1987), p. 2236
- 19) 坂本 浩: 東北大学学位論文 (1985)