

2. 時効硬化が生ずると、衝撃値は著しく低下し、その程度は硬化量に比例する。Al は衝撃値にほとんど影響を与えないようである。Ni は比較的低温における衝撃値をやや改善するが、高温でもほとんど衝撃値が変化しない。

文 献

- 1) W. S. MOUNCE and A. J. MILLER: Metal Progress, 77 (1960) 2, p. 91~94
- 2) J. B. SEABROOK: Metal Progress, 79 (1961) 2, p. 80~83
- 3) G. C. GOULD and H. J. BEATTIE: Trans. Met. Soc. AIME. 221 (1961) 5, p. 893~895
- 4) 日下, 荒木, 佐々木: 鉄と鋼, 49 (1963) 3, p. 553~555

(132) 大型鋼材焼入時の内部温度について

(測定結果の数値計算による追跡)

日本製鋼所, 室蘭製作所

工博 小野寺真作・○富塚 俊一

Internal Temperature of Large Steel Forgings during Quenching.

(Fitting calculated results to measured temperature)

Dr. Shinsaku ONODERA and Shun-ichi TOMIZUKA.

I. 緒 言

大型鋼材の熱処理過程において注目すべき事項の一つは、鋼材表面と肉厚深部の温度差である。熱処理時にこれがどのように変化するかについては、従来から多くの研究があり、簡単な仮定に基く解析と断片的な測定例とに大別される。いずれの場合にも、伝熱常数の温度あるいは材質変化による変化の正確に知られていないことが問題解決の障碍となつている。このことは、焼入のような急速冷却の場合にはとくに著しい。

最近、電子計算機を手近に駆使できるようになり、計算手段上の障碍は取除かれつつある。この段階では伝熱常数の高精度測定(できれば 2~3%, またはそれ以下の誤差での測定)が必要であるが、これは測定技術的に容易に望み得るとは考えられないことである。

そこで本報告では、この問題への一つの段階として、伝熱常数を逐次変化せしめつつ計算を進めることにより、既知の測定結果にできるだけ計算値を接近させるような道筋を辿ることを試みた。

II. 計算式と計算手順

(i) 計算に使用した方程式

十分長い円筒形物体の軸対称熱伝導に関する基礎微分方程式は、

$$C\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) - \frac{\lambda}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \dots \dots \dots (1)$$

ただし、C: 比熱, T: 温度, λ: 熱伝導率
ρ: 比重量, t: 時刻, r: 半径

式(1)にエンタルピ H(T) および函数 φ(T) を導入する。すなわち、

$$H(T) = \int_0^T C dT \dots \dots \dots (2)$$

$$\phi(T) = \int_0^T \lambda dT \dots \dots \dots (3)$$

$$\therefore C = \frac{\partial H}{\partial T}, \lambda = \frac{\partial \phi}{\partial T} \dots \dots \dots (4)$$

式(4)を式(1)に代入し、階差式に直すと、時刻(t+1), 場所 r におけるエンタルピ H_{r, t+1} は次式のよ

$$H_{r, t+1} = H_{r, t} + \frac{\Delta t}{\rho(\Delta r)^2} (\phi_{r+1, t} - 2\phi_{r, t} + \phi_{r-1, t}) + \frac{\Delta t}{2\rho r(\Delta r)} (\phi_{r+1, t} - \phi_{r-1, t}) \dots \dots \dots (5)$$

ただし、式(5)は鋼材軸心および表面以外の部分の計算式である。軸心部については鋼材内の温度分布が常に中心軸に

$$H_{r, t+1} = H_{r, t} + \frac{2(\Delta t)}{\rho(\Delta r)^2} (\phi_{r+1, t} - \phi_{r, t}) \dots \dots (6)$$

また、鋼材表面については、式(5)に次の熱伝達の条件を加味する。

$$\alpha(T_s - T_a) = -\lambda \frac{\partial T}{\partial r}$$

ただし、α: 熱伝達率, T_s: 鋼材表面温度
T_a: 周囲温度

$$H_{r, t+1} = H_{r, t} + \frac{2(\Delta t)}{\rho(\Delta r)^2} (\phi_{r-1, t} - \phi_{r, t}) - \frac{\alpha(\Delta t)}{\rho} \left(\frac{1}{r} - \frac{2}{\Delta r} \right) (T_s - T_a) \dots \dots \dots (7)$$

以上の式(5), (6) および(7)によつて円筒形鋼材内部の温度を計算する。

(ii) 対象とした鋼材とその熱処理

計算の対象とした鋼材内部温度の実測値は次のようなものである。

1. 噴霧冷却の温度測定値

材質: Ni-Mo-V 鋼

形状: 1050mm φ × 2980mm l

冷却条件: 初期温度 830°C に均熱, 清水噴霧焼入

2. 油冷却の温度測定値

材質: Ni-Mo-V 鋼

形状: 710mm φ × 1400mm l

冷却条件: 初期温度 830°C に均熱, 油焼入

(iii) 計算の手順

以上のような条件のもとでの鋼材内部温度の実測値を用意し、熱伝導の微分方程式(階差方程式)に使用される伝熱常数の数値に最初は適当な仮定をおき、その方程式から得られた数値解が実測値と一致するまで、試行錯誤的に伝熱常数の修正をおこなつた。なお、鋼材の比重量の温度による変化は鋼材内部温度に影響を与えるほどではないので、温度にかかわらず 7800 kg/m³ (一定値)とした。また、噴霧冷却の場合の鋼材表面での熱伝達率は、実測温度分布からの概算によつてほぼ一定であることが推定され、これを 1000 kcal/m²hr°C とした。熱伝導の微分方程式は階差方程式に直して、電子計算機

(HIPAC-103 型機) を使用して計算をおこなった。

III. 計算結果

対象とした鋼材に類似する材質の熱伝導率および比熱は、Fig. 1 および Fig. 2 の破線で示すような実測値を文献¹⁾から採用した。しかし、これらは各温度において、鋼材の温度変化が極めて少ない状態のもとで測定されたものであり、熱処理過程において鋼材を急速冷却する場合には異なった値となるはずである。そこで著者は次のような仮定によつてすすめることにした。

(1) 前述の冷却速度における供試材の各半径位置での変態温度範囲は 300~500°C であるので、熱伝導率

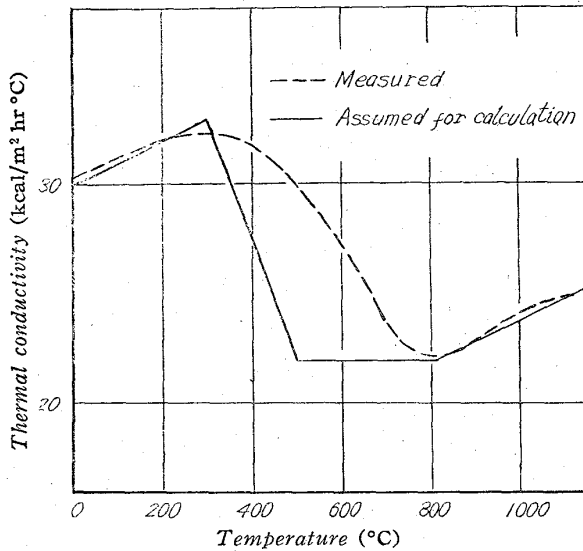


Fig. 1. Thermal conductivity of Ni-Mo-V steel in quenching, compared with the value measured at steady heat flow.

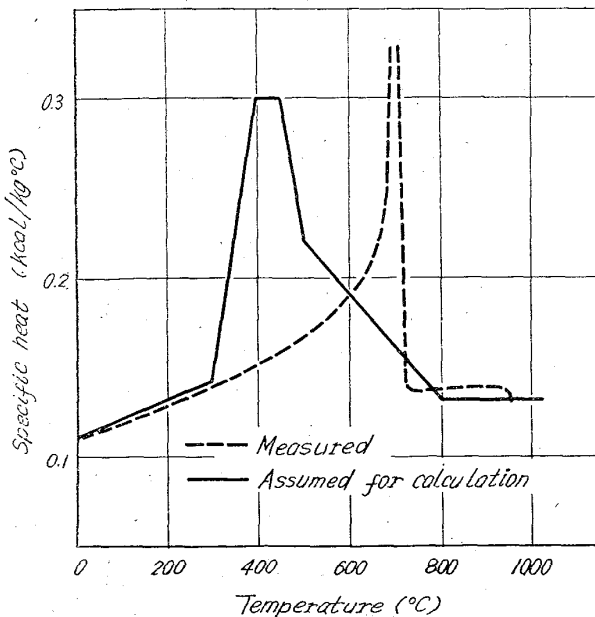


Fig. 2. Specific heat of Ni-Mo-V steel in quenching, compared with the value measured at steady heat flow.

は変態開始直前までオーステナイト組織における最低値を維持するものとして Fig. 1 の実線で示すような変化をするものとみなす。

(2) 次に比熱は同様な過冷に伴い、Fig. 2 の実線のような経過によつて変化するものとみなす。

このような前提のもとに、Fig. 1 および Fig. 2 において、破線と実線の間には数本の曲線を仮想し、Fig. 1 と Fig. 2 の双方の組合せに対して計算結果を求め、これを実測値と対照することを、試行錯誤的に進めた。その結果の代表的な 1 例として Fig. 1 と Fig. 2 の実線のような組合せによつて、前述の供試材について計算した結果が Fig. 3 および Fig. 4 であり、熱伝導率と比熱の適当な選択および組合せによつて、計算結果を実測値に極めて近づけることが示された。なお、以上の計算において大きな影響をもつ表面熱伝達率についても、同様な試行錯誤法による計算を繰返し、油冷却の場合には Fig. 5 のような値を使用すれば最も妥当な結果が得られることが知られた。なお、以上の計算過程は新奇なものではないが計算に多大の手数を要し、電子計算機の高速演算機能を応用してはじめて可能となったものである。

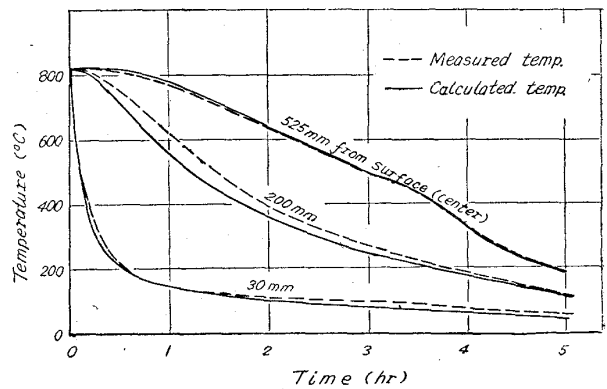


Fig. 3. Cooling curve of 1050mm φ cylindrical forgings of Ni-Mo-V steel in fog quench, a comparison of calculated results with measured temperature.

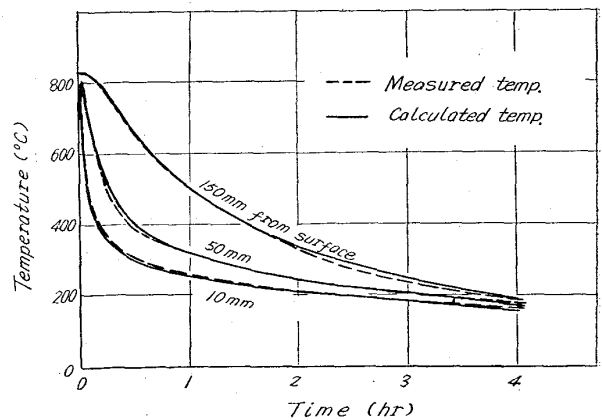


Fig. 4. Cooling curve of 710mm φ cylindrical forgings of Ni-Mo-V steel in oil quench, a comparison of calculated results with measured temperature.

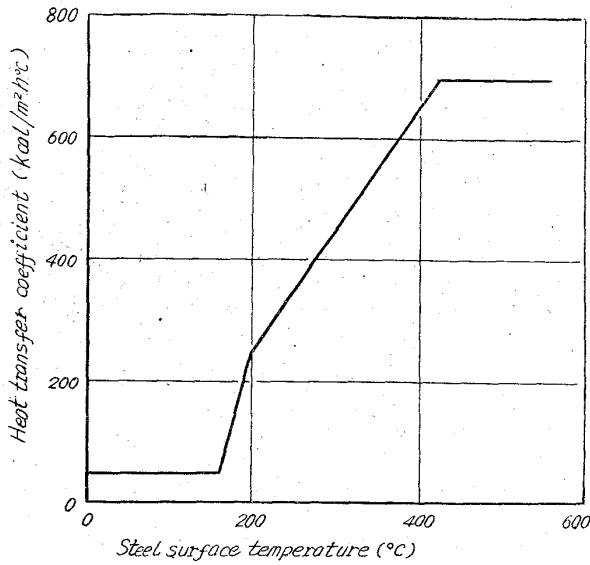


Fig. 5. Assumed heat transfer coefficient at steel-oil interface.

IV. 結 言

冷却中の大型鋼材の内部温度について、電子計算機の高速な計算能力を活用することにより、伝熱常数に微細な仮想的変化を与えつつ、試行錯誤的に追跡する方式により、計算結果をできるだけ測定結果に近づけることを試みた。2, 3の例に示したように、計算値と測定値との差を極めて小さくすることができた。一般に、伝熱常数を温度および材質変化の函数として測定することは極めて困難であるが、本報告で述べた方式によつて、比較的少数の測定例と広範囲の計算結果とを対照するならば、大型鋼材の内部温度の解明に有効な糸口を与えることが可能になるものと考えられる。

文 献

- 1) Metals Handbook Committee: Metals Handbook, (1948), 314, ASM

(133) Si-Cr-Mo-V 鋼のベイナイト組織の焼もどし時における脆性について

住友金属工業, 中央技術研究所
理博○邦武 立郎・加藤 直

On the Embrittlement of Tempered Bainitic Structure of Si-Cr-Mo-V Steel.
Dr. Tatsuro KUNITAKE and Tadashi KATOU.

I. 緒 言

著者らは、耐熱亀裂性のすぐれた鍛造用型材の研究の

過程で、Si-Cr-Mo-V 鋼のベイナイト組織を焼もどす時 500°C 付近で衝撃値が著しく低下することを見出した¹⁾²⁾。この脆性の原因を明らかにするために、若干の検討を加えた結果を報告する。

II. 供試鋼および実験方法

Table 1 に供試鋼の化学成分を示す。

光学顕微鏡、電子顕微鏡による組織観察、X線による残留オーステナイトの測定、炭化物の電解分離分析、熱膨張測定などを行ない究明に努めた。

III. 実 験 結 果

1. ベイナイトの組織

B1 鋼の CCT 曲線によれば、800°C~500°C 冷却時間 100~300sec ではほとんどベイナイトからなる組織となる。例えば径 16mm の丸棒を 950°C オーステナイト化後空冷する時 (800°C~500°C 冷却時間 180sec) 480°C~300°C でベイナイト段階の変態が観察されるのみで、マルテンサイト変態やその他の変態の生起は認められず、硬度 Hv400 程度となる。Photo. 1 にその電子顕微鏡写真を示す。X線回折によればマルテンサイト組織のものには残留γ量は極めてわずかであるのに比して、ベイナイト組織のものには残留γ量がかかなり多量混在することがわかった。

2. ベイナイトの機械的性質の戻もどしによる変化

このようなベイナイト組織のものを焼もどした時の機械的性質の変化を示す。Fig. 1 は、B1 鋼および B2 鋼の 16mm 丸材をオーステナイト化後空冷したのち、各温度に焼もどした時の引張性質の変化を示す。焼もどし温度 400°C~500°C で抗張力は上昇し、絞りは急激な低下を示す。降伏点はこれらとは焼もどし温度に関して若干のずれを示し、焼もどし温度 400°C~500°C ではむしろ若干低下し、500°C~600°C で急激な上昇を示す。一方衝撃値については、15mm 角材について同様の熱処理後試験した結果を Fig. 2 に示したように、400°C~

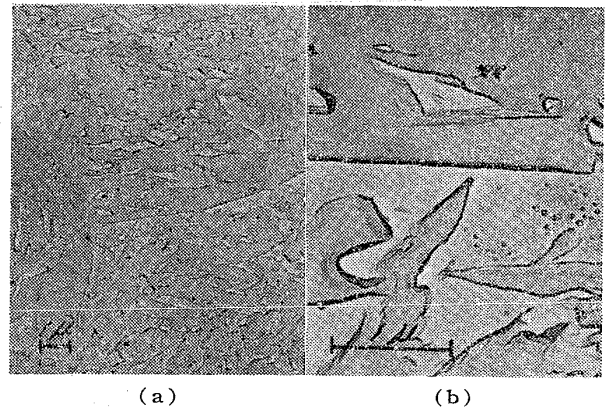


Photo. 1. Electron-micrographs of bainitic structure. (untempered)

Table 1. Chemical composition of steel investigated.

Designation	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Al (sol.)
B 1	0.32	1.46	0.80	0.015	0.008	0.10	0.10	0.97	0.44	0.20	0.002
B 2	0.33	1.51	0.73	0.011	0.014	0.11	0.05	1.01	0.41	0.21	0.005