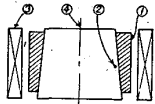


Fig. 2. Ring and shaft.



① Ring ② Shaft (sides) ③ Coil
④ Shaft (core)

Fig. 3. Experiment for temperature measurement.

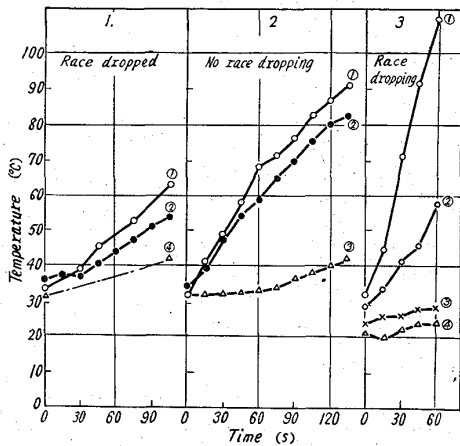


Fig. 4. Experimental results.

通電 135 s 後もリングと軸に適当な温度差ができず輪具は脱落しなかつた。第 1 回と第 2 回の実験の中間に中空丸パイプに 5 l の水を流して実験を行なつたがこの時も輪具は脱落せず、水冷作用による輪具の昇温不足も考えられ、第 2 回は水冷をしないで行なつた。その後方 3 回の実験の前にアンペアタンの不足も考えられるのでさらに中実角コイルで巻数を中空丸パイプと同様 15 にして行なつた。入力電圧 28.5V で通電後 105 s で輪具は脱落することより、アンペアタンの影響とも思われず、さらに第 3 回の中実角パイプのものを作製し上記の条件で行なつた。これは角コイルによつて導体と導体間の電流密度が丸パイプより高くすることを目的としたものである。角パイプの構造は Fig. 5 に示す通りである。次に高周波回路と同じような考え方で計算を行なつた。計算：第 3 回の実験について計算値をかかげ参考に供する。

コイル： $S_H = 1 \text{ cm}$ $R_H = 0.0145 \Omega$ $X_H = 0.0256 \Omega$
 リング： $S_W = 1.89 \text{ cm}$ $R_W = 0.0116 \Omega$ $X_W = -0.0025 \Omega$
 総抵抗： $R = 0.0261 \Omega$ 総リアクタンス： $X = 0.0231 \Omega$
 インピーダンス： $Z = 0.0348 \Omega$ 力率： $\cos \phi = 0.829$
 効 率： $\eta = 0.446$

リングの計算消費電力 $N_W = 20.4 \text{ kW}$ 、ただし電圧を 46V とする。ここに S_H , S_W , R_H , R_W , X_H , X_W は

くさらに第 2 回目に中空の丸パイプでコイルを製作し約 5 kg 軽量化することができたが入力電圧の不足とコイルの接近の故に図に示すように

コイルおよびリングの電流浸透深さ、抵抗、リアクタンスを示す。計算によれば 0.1 mm の締代を誘導加熱の膨張により零にするには輪具と軸との温度差は軸受鋼の線膨張係数 $\alpha = 12.5 \times 10^{-6}$ 、平均輪具径を 210.5 mm とすれば 38°C でよく第 1 回、第 2 回、第 3 回でそれぞれ測定温度差①-②は約 10°, 8°, 51°C であつた。第 1 回は 10°C で輪具が脱落しているがこれは締代の読みに誤差があつたと思われる。今負荷の電力消費の分布を e^{-2X/S_W} で計算すると、約輪具に消費される電力およびそれに隣接する部分の仮想輪具のその比は全体を 100 とすると 67.1 : 19.4 となり、それらに発生する温度上昇は互いに熱伝導および放散がないものと仮定すると第 3 回と第 4 回の実験では輪具および仮想輪具の温度上昇はそれぞれ毎秒 0.92°, 0.353, 1.41°, 0.44°C となり相互の温度差はそれぞれ 0.567°C, 0.87°C 毎秒となり、38°C の差をもつていた時間は 67 s, 43.6 s となる。第 3 回と第 4 回の実験ではそれぞれ 60 s, 34 s であつた。

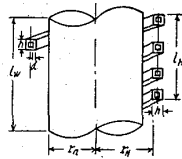


Fig. 5. Heating coil.

III. 結 言

この試作研究で低圧、軽量化の誘導電気加熱コイルが実用しうることを知り、かつ着脱を迅速化すると同時に軸受の損傷を完全に防止しうる見通しを得た。

文 献

- 1) VAUGHAN, WILLIAMSON: Design of Induction-Heating Coil for Cylindrical Non-magnetic Load, 64(1945), Aug. p. 587~592
- 2) W. BRUNST: Die induktive Wärmebehandlung, 1957, s. 58~68.
- 3) K. KEGEL: Die Vorausbestimmung der Einhärtetiefe beim Induktions-Härte. BBC Mitteilungen, Nov. 1951.
- 4) WITHNEY: Iron & Coal Treads. Rev., 109 (1924), p. 390.
- 5) NAGAOKA: J. Col. Sc. Tokio, 27 (1908), p. 18.
- 6) BURCH: Theory of Eddy Current Heating, London, 1928.

669.14-412.621.78.011=621.191.33
 (109) 鋼塊における熱応力の理論的
 解法について 62289

(鋼塊の熱応力亀裂に関する研究-I)

山陽特殊製鋼 〇原 隆 啓

On the Theoretical Solution of Thermal Stress in Steel Ingots. 1405~1407
 (Study of thermal stress crack in steel ingots-I)

Takahiro HARA.

I. 緒 言

高炭素鋼および高炭素クローム軸受鋼の比較的大型鋼塊を加熱炉において、加熱する場合にはしばしば鋼塊割れが発生する。この割れの特徴は鋼塊の中腹部数カ所に鋼塊の中心付近に横割れがおこる。この原因としては、い

いろいろな条件が考えられるが、特に加熱条件について、実験と理論的考察を行なったので、その概要を報告する。

鋼塊が加熱される過程において、鋼塊内部に発生する熱応力を知るためには、まず第1に鋼塊内部の温度分布を知る必要がある。実際には表面温度はなんらかの方法で実測することは容易であるが、内部温度分布を測ることは容易ではない。このために熱伝導の理論的計算が必要となるが、従来まであまり正確な計算がためされていない。ここで、鋼の高温における熱的性質を充分考慮に入れた理論的計算方法を求め実測値とよく一致することを立証した。第2に、この温度分布により発生する熱応力を理論的に計算する方法として、鋼の高温における弾性的性質および塑性的性質を実測し、また変態点付近の熱膨張の変化を求め、高温の弾-塑性域における応力および塑性流動を計算する。これによつて内部亀裂の発生機構を明らかにする一例について略記する。

II. 熱伝導の実験と計算および考察

熱伝導の実験方法として、次の2つの方法で温度を測定し、その時の条件における理論的計算と比較する。

小型試験炉による熱伝導の実験として、試験材 200φ および 200φ × 600(mm) のもので、表面および中心の温度上昇を測定した。一例を Fig. 1 に示す。

バッチ炉による熱伝導は、鋼塊 400φ および 400φ × 1500(mm) の形状のもので同様な実験を行なった。一例を Fig. 2 に示す。

熱伝導の理論的計算方法は、熱的性質が温度によつて変化するものを十分に考慮に入れた階差近似方程式に分解し、表面温度より中間温度および中心温度を計算した(計算式省略)。

加熱実験には軸受鋼 (SUJ 2) について行なった。試験炉における熱伝導では、実測値と計算値は良く一致した。この炉の加熱条件は表面にフレームが充分に廻るので偏熱なく、良く一致したが、バッチ炉における実際の鋼塊における加熱では、炉の形状からも上下面の偏熱があるから実測値と計算値に幾分の差が認められる。しかしながら、本質的には全く一致していると思われる。

つぎに、丸型鋼塊における中心から表面までの温度分布は、表面、中間、中心温度の計算値から、次ぎの式で

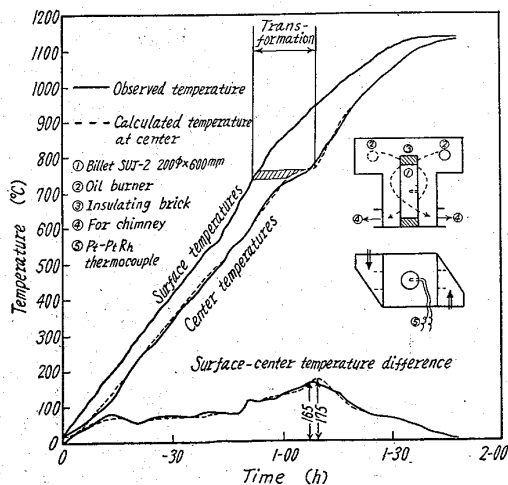


Fig. 1. Time-temperature heating curve of the circular billet in a test furnace.

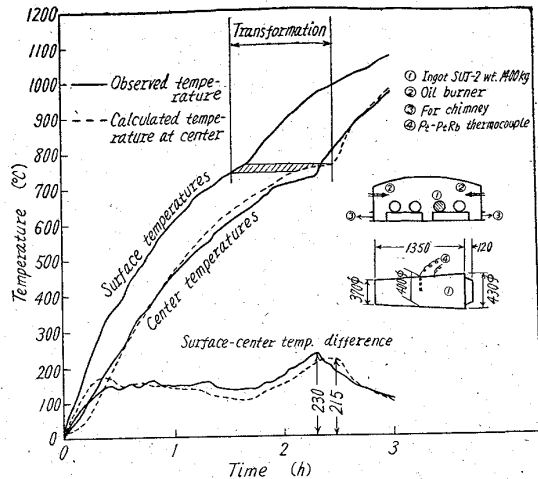


Fig. 2. Time-temperature heating curve of the circular ingot in a batch-type furnace.

表わすことができる。

$$t = t_i / \{J_0(\lambda_1) - 1\} \times \{J_0(\lambda_1 r/a) - 1\}$$

ただし、 t : 任意半径 r 点の中心との温度差、 t_i : 表面 a の中心との温度差、 λ_1 : 温度分布定数である。

III. 弾-塑性域の応力および塑性流動の計算

丸型鋼塊を無限中実円柱と仮定し、温度分布が決定されれば、熱応力の式が求められる。しかしながら、完全弾性体の場合は線形の応力-歪関係の式であり、普通の方法で解くことができるが、塑性変形を起す場合は直接解を求めることが容易でない。したがつて、このような非線型微分方程式を非線型積分方程式に変換し、逐近似法を適用して解くことにする。

計算方法としては、計算すべき鋼種の高温における単軸引張り応力および塑性流動の状況を調査し、2軸および3軸応力に適用するために、相当応力(σ_e)、相当全歪(ϵ_{et})、相当塑性歪(ϵ_{ep})の概念を導入することにより求めることができる(計算式省略)。

塑性流動の割合は温度によつて非常に変化するため、温度との関係を求めておかなければならない。したがつて、応力-塑性歪が一次式で表わされると仮定し、その定数がいろいろな温度によつて変化するものと考え次式で示す。

$$\epsilon_{ep} = A \epsilon_{et} - B$$

ここで、 A および B は1軸引張り試験におけるいろいろな温度の定数であり、この値が実験で求められたとする。

一般の鋼種ではオーステナイト変態を有するものであり、この変態点で熱膨張の急激な変化がある、この変化を直線的变化と見做し、 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ を変態前、変態中および変態後の熱膨張率と置いて計算することができる。これらの変化をすべて考慮して変態中の応力および塑性流動を計算し、内部亀裂の発生条件を検討することが可能となつた(計算式省略)。

計算一例として、高炭素クロム鋼の 1.4 t 丸型鋼塊(平均断面 400mmφ、長さ 1,500mm)について、変態点を通過するときの応力および塑性流動の変化を計算した一部を Fig. 3 および Fig. 4 に示す。

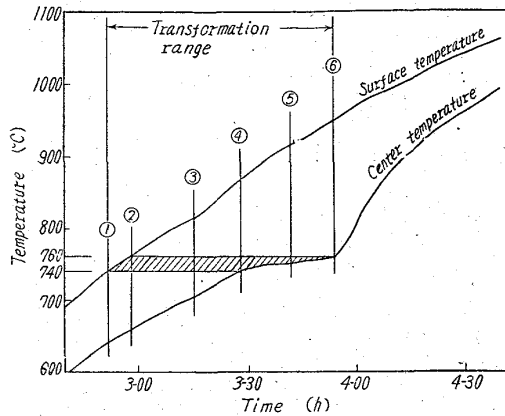


Fig. 3. An example of heating curve and calculating points for a high-carbon chromium steel ingot.

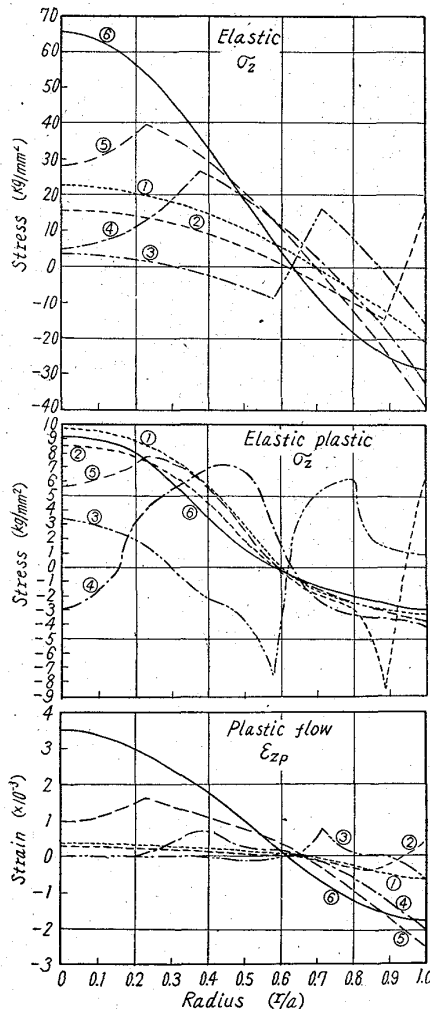


Fig. 4. Variation of axial stress and axial plastic flow distribution when the high-carbon chromium steel ingot heating passes through the transformation point.

IV. 総 括

(1) 鋼塊における非定常熱伝導を計算によって求める方法を確立し、実測値とよく一致することを確認した。

加熱過程において、表面—中心温度差の最大値は、過共析鋼で変態温度範囲の狭い鋼種では中心が変態完了するときに最大であることが明らかにされた（低炭素鋼では最大温度差と変態完了とは一致しない）。

最大温度差の大小は変態中の表面温度差を制御することによって、温度差が決定できる。

(2) 高温における弾—塑性範囲の応力および塑性流動を計算する方法を確立した。特に鋼の変態進行による応力変化を求めた。

内部応力は、表面で圧縮応力が発生し、中心に引張り応力が起り、なほ軸方向応力が最大である。この場合も中心が変態を完了するときに最大であることを明らかにした。鋼塊の中心付近に亀裂を生ずるときは、中心が変態完了するときに発生する危険性が大きいことを計算によって確認することができた。

669.14-412-621.78.011-620.192.46

(110) 加熱過程における内部亀裂の生因について 62290

(鋼塊の熱応力亀裂に関する研究—II)

山陽特殊製鋼

○原 隆 啓

On the Formation of Internal Crack in Heating Process. 1407~1409

(Study of thermal stress crack in steel ingots—II)

Takahiro HARA

I. 緒 言

高炭素鋼々塊を加熱するとき、鋼塊内部に発生する割れの発生条件および発生時期について、実験および理論的計算を行ない、これを明らかにする。熱伝導および応力計算は第1報に述べたが、これを求めるためには、鋼の高温における弾性率の測定、熱膨張率の測定および塑性流動の測定を必要とするので、その概略と計算結果の要点を報告する。

II. 加熱割れの実験と考察

実験資料として、高炭素クロム軸受鋼 (SUJ 2) の 1.4 t 丸型鋼塊 (400φ×1,500) および 1.7 t 角型鋼塊 (400φ×1,500) の2種類について行なつた。

試験用鋼塊3本と温度測定用鋼塊1本を同時にバッチ炉にならべて装入し加熱を行なつた。鋼塊内部の亀裂発生時期を調べるために、ingot ①, ingot ②, ingot ③をそれぞれ変態開始前、変態中および変態後の3段階にわけて、炉外に取りだして鋼塊内部を調査した。

加熱要領を Fig. 1 に示し、実験結果をまとめて Table 1 に示している。内部亀裂の調査には超音波探傷機によつて欠陥を調べ、欠陥が現れた鋼塊は縦方向に中心から切断して亀裂の状況を確認した(例 Photo. 1)。

初期加熱 θ_1 はすべて約 500°C/h で行ない、この加熱では内部亀裂は発生しなかつた。また変態が表面と中心の間にあるとき取出した鋼塊にも内部亀裂は発生していないことがわかつた。変態を通過したものは、中心が変態完了したときの表面—中心温度差が計算値で 230°C~240°C 以下のもので鋼塊の中心付近において横方