

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

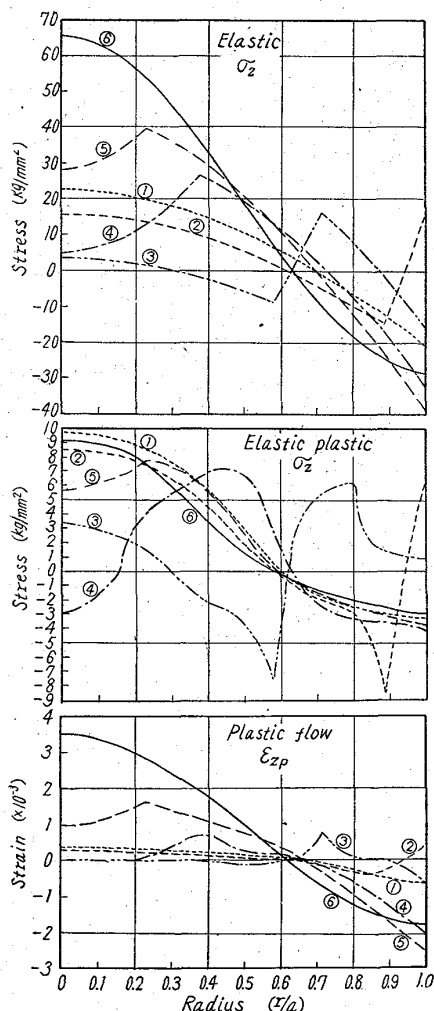


Fig. 4. Variation of axial stress and axial plastic flow distribution when the high-carbon chromium steel ingot heating passes through the transformation point.

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、過共析鋼に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では、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

Table 1. Experimental data of thermal stress cracks in batch-type furnace heating for high-carbon-chromium steel ingots.

Test No.	Ingot section	Mean surface temperature elevating degree		Surface-center temperature difference in transformation end		Observation of internal crack in tested ingots		
		Initial range θ_1 ($^{\circ}\text{C}/\text{h}$)	Transf. range θ_2 ($^{\circ}\text{C}/\text{h}$)	Observed ($^{\circ}\text{C}$)	Calculated ($^{\circ}\text{C}$)	Ingot ①	Ingot ②	Ingot ③
1	Circular	400	225	220	220	No	No	No
2	//	550	250	249	220	No	No	No
3	//	550	288	240	240	No	No	Crack
4	//	500	270	190	230	No	No	Crack
5	//	500	350	—	270	—	—	{ a. Crack b. Crack
6	Square	500	230	215	255	No	No	Crack
7	//	500	245	220	250	No	No	Crack
8	//	500	160	170	180	No	No	No

向に円盤状に亀裂が発生していた。この温度差は丸型および角型鋼塊とも大体同じ温度である。

III. 鋼の高温度における諸性質

鋼の高温度における熱応力および塑性流動を計算する

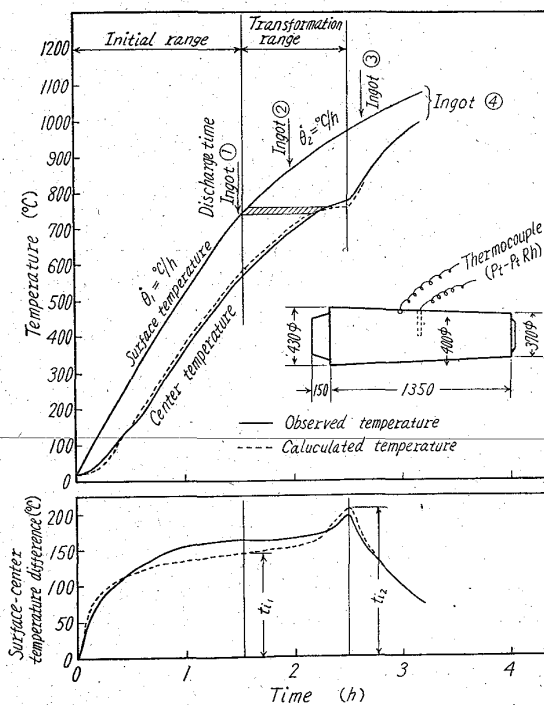
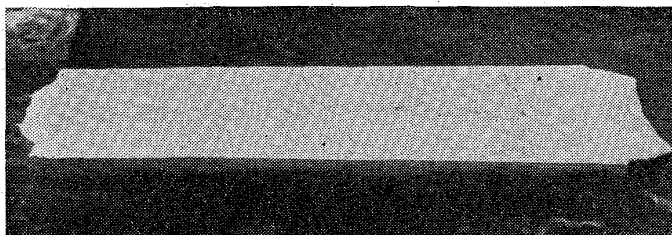


Fig. 1. Time-temperature heating curves of high-carbon chromium steel ingot in a batch type furnace.



Circular ingot of Test No. 5 (Ingot ③ b)

Photo. 1. Thermal stress crack of the tested ingot.

ために次の実験を行なった。その概要を述べる。

(1) 高温度における弾性率の測定

炭素鋼、合金鋼および高合金鋼のうちから 10 種の鋼種について、常温から 1000°C までの範囲で測定した。

温度による弾性率の変化は、ほとんどの鋼種で、400°C 付近まで直線的に下降し、500°C~600°C 位で曲線的に下降している。弾性率、剪断弾性率およびポアソン比などは組織不感性で、わずかの添加元素や不純物あるいは熱処理などによる影響はあまり大きく認められなかった。

ポアソン比は文献によると、0~900°C 位までに約 0.30 から 0.35 位まで直線的に上昇することである。

(2) 熱膨張率の測定

これも各種の鋼のうちから 13 鋼種について熱処理別に熱膨張率を測定した。同じ鋼種で熱処理による熱膨張率の差は、焼入組織を除き、あまり大なる差は認められなかった。変態開始前まで熱膨張率の比較は、鋼種によりあまり影響がないが、変態完了後、いわゆるオーステナイト域の熱膨張率は鋼種によつて相当な差が認められた。変態完了時の熱膨張率を鋼種別にプロットして、応力発生を比較した。ここで、同じ温度差がある場合の応力発生割合は炭素含有量とともに増大し、過共析鋼の SK 2, SUJ 2, 3 などが最大となっていることが明らかとなった。

(3) 高温引張り試験

鋼の高温度における抗張力、破壊強度および塑性流動の状況を調査した。試料は軸受鋼(SUJ 2)の圧延された試片および鋼塊から切り出した試片の 2 種類において、常温から 1000°C までの温度範囲で行なった。

抗張力、破断応力、伸びおよび絞りの測定値より、圧延試片および鋼塊試片ともに、300°C 付近に低温脆性があり、750°C~800°C 付近に高温脆性があることが確認された。また塑性流動の計算においても同じ温度で塑性流動が比較的少ないことが明かにされた。そして高温脆性点は変態完了温度であることが示されている。

IV. 連続式加熱炉における実績と理論的考察

連続炉における鋼塊割れの発生する条件は、実績から、理論的に計算された温度で、丸型角型鋼塊ともに

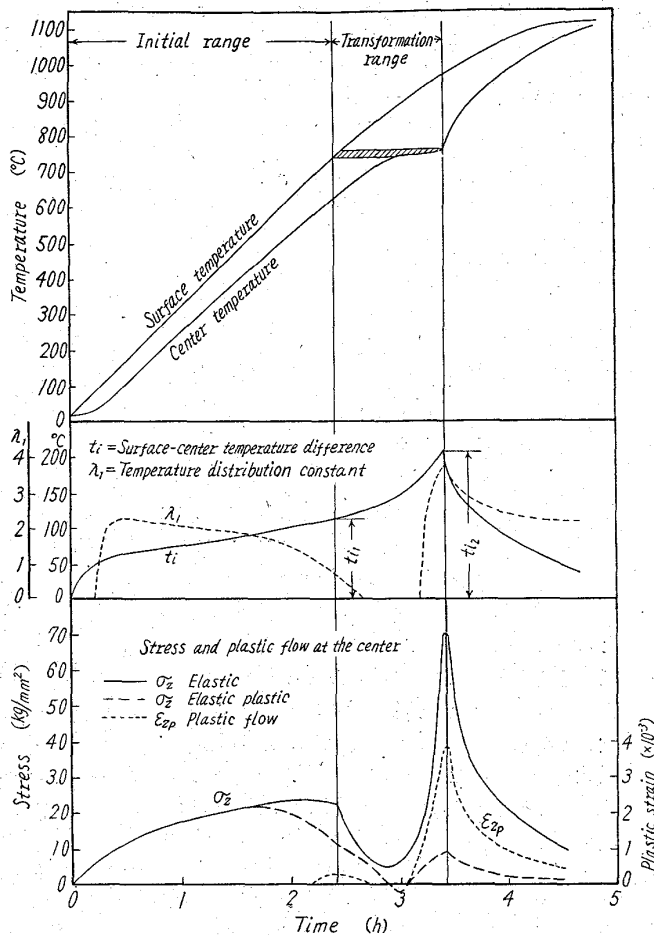


Fig. 2. Calculation of stress and plastic at the center in heating process for high-carbon chromium steel ingot.

中心が変態を完了したときの表面-中心温度差が約 240°C 以上になれば急激に内部亀裂が発生することが確認された。このことは実験とよく一致している。

連続炉における温度上昇の状況から数例をとり理論的な内部応力を計算してみた。この一例を Fig. 2 に示す、図には鋼塊中心の軸方向のみの応力変化を示したが、3 軸とも引張り応力であり、次の関係を有す。

$$\sigma_z : \sigma_r : \sigma_t = 2 : 1 : 1 \text{ (応力)}$$

$$\epsilon_{zp} : \epsilon_{rp} : \sigma_{tp} = 2 : -1 : -1 \text{ (塑性流動)}$$

したがって中心ではこの関係を保ちながら変化する。

加熱過程における計算結果から、変態が完了するときに中心において急激に応力および塑性流動が増大することが明瞭になった。この時の最大値が温度差によつて変化する状況を表わしたのが Fig. 3 である。ここで特記すべき事項は、温度差の増加（加熱速度が増加）とともに弾性応力（完全弾性体と仮定）は増加しているが、弾-塑性応力は一定値（9.1 kg/mm²）である。これは塑性流動が増加するために応力は増加しないことを示している。しかしながら中心では 3 軸応力であり塑性が拘束されている状態で急激な変化を起す訳であるから、その流動中に塑性遅れが生じるのではないかと考えれば塑性流動中は応力はなお高いものであると考えられる。変態完了温度（約 760°C）では破壊応力は約 13 kg/mm² 程

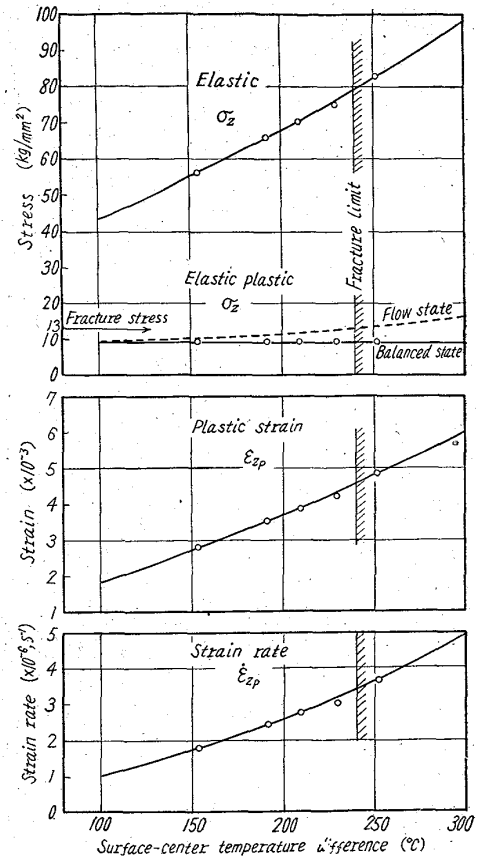


Fig. 3. Relation between surface-center temperature difference at transformation and stress and plastic strain, strain rate at the center of an ingot.

度である。もし塑性遅れが歪速度および塑性流動量に比例するものと仮定し、約 2 (%/×10⁻⁶ s⁻¹/strain) の塑性遅れがあつたとすれば、温度差が 240°C のとき 13 kg/mm² となるからこれ以上の温度差では破壊が起るであろうということになり、温度差が大きい（加熱速度が大きい）ほど鋼塊内部亀裂が発生するという現象を充分に説明することができることになった。またこの応力の状態から考えても、鋼塊割れは、中心付近において軸方向に直角なる円盤状の亀裂が発生することが明瞭に説明できる。