

残留応力除去に関する二、三の実験*

高 沖 亮**

SOME EXPERIMENTS ON RESIDUAL STRESS RELIEVING

Akira Takaoki

Synopsis:

In large forgings, such as turbine rotor, it is important operation to relief the residual stress. Therefore some experiments on stress relieving were studied by the Sachs's boring-out method. The specimens (70mm diameter, 210mm long) were quenched in water from just below A_c1 transformation temperature, and then reheated at various temperatures and during different hours (100~600°C, 1~90h). The results obtained were as follows;

- (1) Residual stress relieving depended mainly on the heating temperature, and the curve of stress relief showed linearity for it.
- (2) Heating for long time had scarcely affected on the stress relieving.
- (3) Variation of hardness at the surface of specimens by tempering showed approximately the condition of stress relieving.

I. 緒 言

大型鍛鋼材，とくにタービンローター等の残留応力除去は大切な作業の一つである。これらの残留応力には熱処理による応力の外機械加工歪等があり，除去に当つては鋼材を一様に加熱する方法を調質後行うのが通例である。

本報告は変態の影響を全く受けない冷却応力を70φ丸棒に残留せしめ，それを各種の温度および時間で一様に加熱した時の応力除去状況を調べたものである。すでに H. Büler, E. Scheil, S. Fuchs その他により焼入れ戻しによつて変態が加味されたものの応力測定は若干行われている。しかし純粋な冷却応力の除去状況について，また時間の影響についての報告は見当らないようである。測定には Sachs の方法を用いたが，これは変態を考慮に入れた計算にも利用するためのものである²⁾。

II. 試料および実験要領

C0.33% 炭素鋼，C0.38% 炭素鋼および Cr 鋼 (C 0.87%, Cr 1.70%) からそれぞれ直径 70 mm 長さ 210 mm の試料を多数製作した。Table 1 にその熱処理要領を示すごとく，加熱時間を一定として温度の影響および加熱温度を一定として時間の影響等をしらべた。Fig. 1 は温度測定要領を示し，温度および時間は A 点で測定した。試料中心温度 (B 点) が試料表面温度 (A 点) と一致する時間曲線を常に図示のごとくなるよう電流調整を行つた。なお，C 点と A 点とでは温度差はほとんどなかった。

Table 1. Specimen and its heat treatment.

0.33% C-steel		Cr-steel	
No.	Heat treatment	No.	Heat treatment
1	700° W.Q	31	700° W.Q
2	// 100° × 2° A.C	32	// 100° × 2° A.C
3	// 200° // //	33	// 200° // //
4	// 300° // //	34	// 300° // //
5	// 400° // //	35	// 400° // //
6	// 500° // //	36	// 500° // //
7	// 600° // //	37	700° A.C
8	700° W.Q	31	700° W.Q
9	// //	38	// 140° × 2° A.C
10	// 116° × 1° A.C	39	// // 14° //
11	// // 40° //	40	// // 30° //
12	// 200° × 1° //	41	// // 90° //
13	// // 2° //	42	// 500° × 1° //
14	// // 10° //	43	// // 4° //
15	// // 40° //	44	// // 6° //
16	// 300° × 1° //		
17	// // 2° //		
18	// // 10° //		
19	// // 30° //		
20	// 400° × 1° //		
21	// // 2° //		
22	// // 6° //		
23	// // 18° //		
24	// 500° × 1° //		
25	// // 2° //		
26	// // 4° //		
27	// // 10° //		
28	// 600° × 1° //		
29	// // 10° //		
30	700° A.C		
			0.38% C-steel
		No.	Heat treatment
		45	700° W.Q
		46	// 420° × 2° A.C
		47	// // 6° //
		48	// // 10° //
		49	// // 20° //
			Cr-steel { C 0.87% Cr 1.70%

残留応力測定には G. Sachs の方法³⁾を用い，熱処理

* 本会第 42 回講演大会にて発表

** 日本製鋼所室蘭製作所研究部

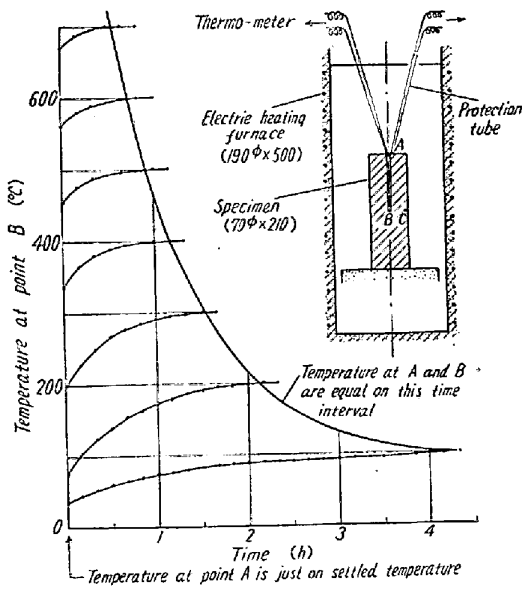


Fig. 1. Coincidental time curve of temperature at center and surface of the specimen which is on heating.

後試料は全面研磨仕上を行い、歪測定にはストレーンゲージおよびマイクロメーターを併用した。穿孔に当っては水冷を用い、歪測定時はなるべく試料と室温とを一致するごとく注意した。その結果軸および径方向の歪測定値のバラツキは少なく非常に滑らかな曲線がえられた。

III. 実験結果

1. 各種温度で一定時間保持した場合

700°C W.Q 試料を 100~600°C で各々 2 時間保持した時の残留応力分布を Fig. 2 に示す。実測点は $r=6.6 \sim 30$ mm 間でその他は外挿した。すなわち軸および切線方向では中央が引張、外周で圧縮応力となり、軸方向で $r=21 \sim 24$ mm, 切線方向で $r=15 \sim 18$ mm においては応力は zero となつている。応力除去の過程では応力 zero の点はほとんど変化なく、応力除去状況については分布曲線のいずれか一箇所について調べればよい。

Fig. 3 は $r=10, 20, 30$ mm における各方向の応力が加熱温度(2時間保持)により除去される状況を示す。用いた 3 種の試料ではいずれも大差なく、ほぼ直線的な除去曲線を取り、各方向の応力についてはほぼ同一である。

2. ある加熱温度で保持時間を変えた場合

Table 1 に示す試料 8~30, 38~49 はいずれも 100°~600°C 加熱に当りその保持時間を変えたものである。その内 500°C 加熱の C 0.33% 炭素鋼に例をとり軸方向の応力分布を Fig. 4 で示す。700°C W.Q 試料に比し応力は非常に小となつているが、1~10 時間保持で若

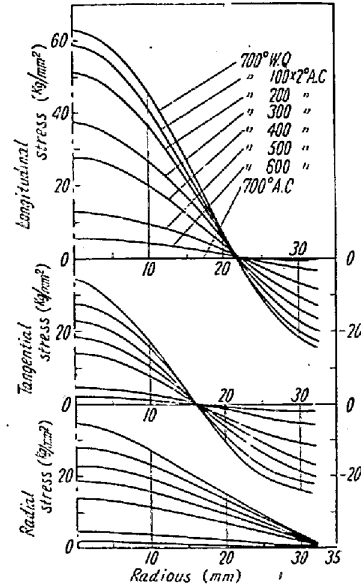


Fig. 2. Residual stress distribution in 70φ bars heated 2 h at 100~600°C.

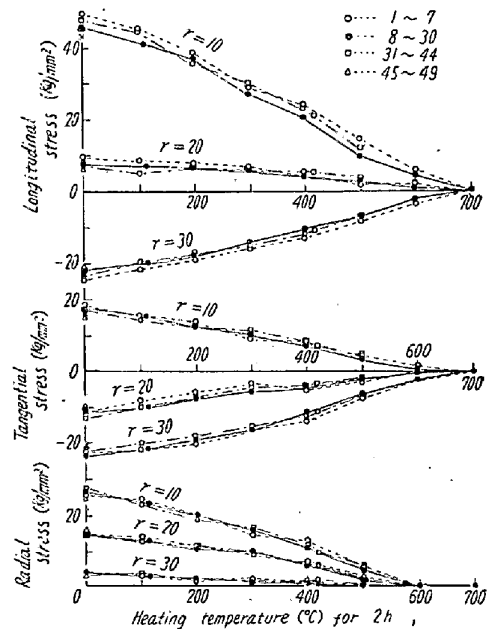


Fig. 3. Influence of heating temperatures on residual stress relieving at $r=10, 20, 30$ mm.

干変化する。Fig. 5 は 300°C, 500°C 保持の例を軸方向応力について示したものである。すなわち加熱によつて応力除去が行われるが、初期の除去速度は大であるが長時間加熱によつては効果がほとんどない。これはある温度に加熱される間に除去される量を含んでいることも関係している。また測定方法にもよるが応力除去速度は低温で小で高温になると非常に大となることがわかる。

3. 総合的表示および硬度変化について

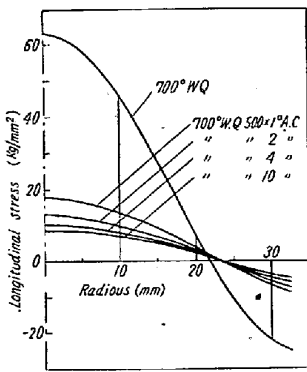


Fig. 4. Longitudinal stress distribution in 70 φ bars heated 1~10h at 500°C.

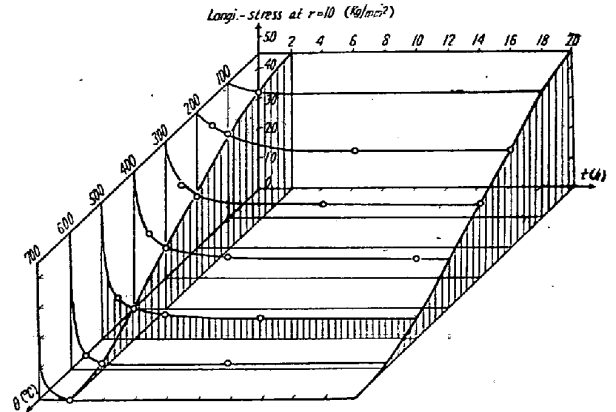


Fig. 6. Stress relieving diagram by heating temperatures and time.

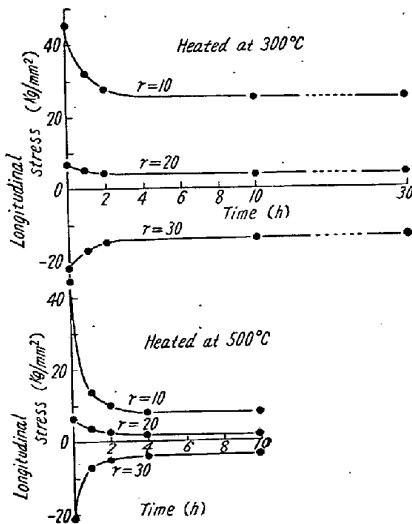


Fig. 5. Influence of heating time at 300° and 500°C on the residual stress at r=10, 20, 30 mm.

r=10 mm における軸方向の応力について加熱温度および時間の影響を取纏めたものが Fig. 6 である。応力除去は大部分加熱温度の函数であつて保持時間については余り影響を受けないこと、また高温加熱程除去速度が大であることがわかる。

Fig. 7 は各加熱温度で長時間保持した後(約 20 時間)の残留応力状況を示す。各 2 時間保持した Fig. 3 と比較して、応力はさらに除去されていることがわかる。また、610°C 附近を zero とした直線関係がよくわかる。ここで、 σ_0 を最初の残留応力とし、ある加熱温度 θ で長時間加熱したときの残留応力を σ_1 とすると

$$\sigma_1 = \sigma_0 - \sigma_0 \cdot \theta / 610 \quad (t \rightarrow \infty) \quad \dots \dots \dots (1)$$

で簡単に表示される。

Fig. 8 はこれら試料の表面硬度の変化を調べたもので点線で示す曲線は各種温度で 2 時間保持、実線で示す曲線は保持時間による変化を示す。Fig. 3, Fig. 5 等に示す結果とよく一致した傾向を表わしている。

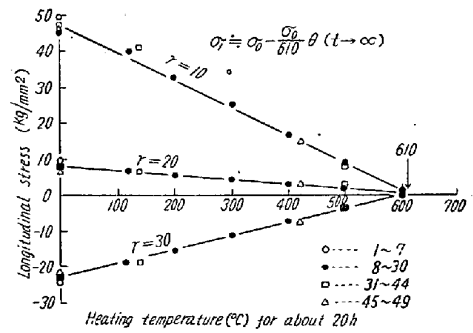


Fig. 7. Relation between residual stress and heating temperatures (after 20 h heating).

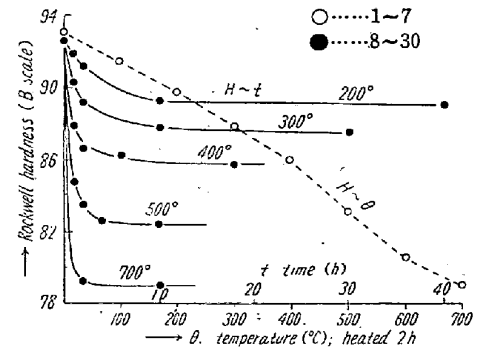


Fig. 8. Relation between surface hardness and heating temperatures and time.

IV. 実験結果の考察

残留応力除去は主として加熱温度 θ の函数で加熱時間 t についてはほとんど影響は受けない。しかし Fig. 5, 6, 7 に示すごとく質量を考慮に入れてもなお若干応力は時間によつて変化し、低温側では除去速度は小で高温側で大である。ここで速度を考慮するには若干無理があるが、えられた結果の表示に対して、つぎの考察を行った。

任意時間 t における残留応力 σ と長時間加熱 ($t \rightarrow \infty$)

によつてもなお除去しえざる応力 σ_1 との間に次式のごとき関係があると考へた。

$$\frac{\partial}{\partial t} (\sigma - \sigma_1) = -\kappa(\sigma - \sigma_1)$$

すなわち $\sigma - \sigma_1 = (\sigma_0 - \sigma_1)e^{-\kappa t} \dots \dots \dots (2)$

とおいた。 σ_1 を実測結果と合致するごとく κ を適当に選ぶと Fig. 9 がえられる。ここで κ は応力除去速度恒数と呼ぶべきもので、 θ の函数である。かくして求めた κ を θ に対して調べると Fig. 10 に示すごとく直線関係がえられる。すなわち

$$\log_e \kappa + B/T = \log_e C = \text{const}$$

$$\kappa = c \cdot e^{-B/T} \dots \dots \dots (3)$$

形式で表わされる。 κ は θ の大なるほど大であつて、応力分布上で応力値の大なるものほどその傾斜が大きいが B がこの傾斜を表わす常数で r によつて定まるエネルギー量を示す。 C は r により定まる常数、 T は絶対温度を示す。

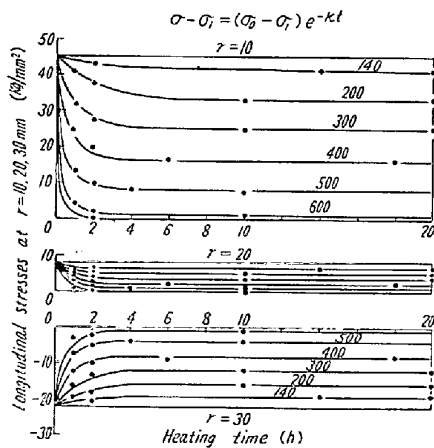


Fig. 9. Relation between residual stress and heating temperatures and time.

以上は残留応力除去については加熱温度、すなわち加へた解除エネルギー量、によつて一定の除去量があり、さらに応力を除去するための長時間加熱には意味がなくより大なる熱量を与える必要があることを示した。また加熱温度に比例した応力除去があり約 610°C 附近で完全に除去された。なお、この実験結果と S. Fuchs¹⁾ が 50φ の 0.30% C の炭素鋼を 850°C から水焼入れして

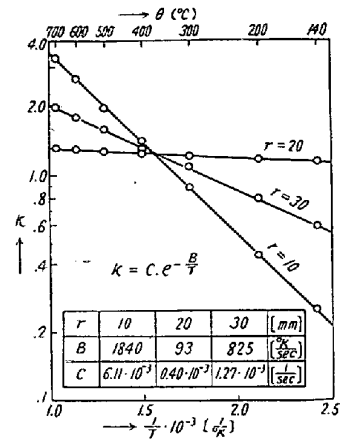


Fig. 10. Relation between the coef of stress relieving velocity and temperature.

各種温度に焼戻した時の残留応力測定結果と比較すると変態による応力除去量はほとんどなく、急冷による冷却応力とその除去とが大部分を占めていることがわかる。

V. 結 言

70φ 丸棒を Ac₁ 変態点直下から急冷した時の残留応力について、各種の温度時間で一樣に加熱し、応力除去状況を Sachs の方法で求めた。その結果、加熱温度によつて定まる一定の除去量があり、加熱時間はほとんど影響しない。また 610°C 附近ではほぼ完全に応力除去は行われそれ以下では温度に比例して除去される。

最後に本研究発表を許可せられた日本製鋼所室蘭製作所所長取締役皆川孝光氏、御指導御鞭撻を戴いた同所研究部長下田秀夫博士ならびに実験に並々ならぬ御尽力を戴いた同研究部の大沢徳己君に深く感謝する。

(昭和 31.年 9 月寄稿)

文 献

- 1) H. Bühler, E. Scheil: Arch. f. d. Eisenhüttenw. 6 (1933). 283, 7 (1933/34), 359
S. Fuchs: Arch. f. d. Eisenhüttenw, 7 (1933/34), 315
菅野 猛: 本誌, 36 (1950), 61, 548
- 2) 高沖 亮: 一部を昭25年日本鉄鋼協会第40回講演大会にて発表
- 3) G. Sachs: Z. f. Metallk. 19 (1927), 352