鋼の熱処理による残留応力の挙動*

今井 勇之進** 市 毛 博***

Yunoshin Imai and Hiroshi Ichige: The Residual Stresses due to the Heat Treatment of Steels. Using Mn steel, Mn-Cr steel, Mn-Cr-Ni steel and bearing steel of 5.0 mmφ cylinder, the effects of residual stresses on their oil quenching, water quenching and subzero quenching were investigated by Heyn's method. Changes in stress due to tempering of these specimens were also measured. Changes in hardness or amount of retained austenite by these heat treatments were also studied. The results obtained are as follows; (1) The distribution of stress in all the specimens showed a stress-transformation type as it change into tension near the surface and compression at the center of the section, and the stress resulting from oil quenching was smaller than that resulting from water quenching.

(2) According to the subzero treatments after oil or water quenched, the hardness was remarkably increased and the amount of retained austenite were clearly decreased, while the distribution of stresses due to subzero treatments changes little.

(3) The residual stress began to decrease by tempering at about 200°C, decreased considerably at about 400°C and disappeared completely at 600°C.

(Received December 12, 1963)

I. 緒 言

鋼の熱処理による残留応力について、古くからかなり系統的な研究報告^{(1)~(10)}があり、残留応力の生起の機構が次第に解明されつつある。しかし Fe-Ni 合金について主として論じ^{(3) (5) (7) (8)}、各種合金元素を含んだ高炭素鋼についての研究はまだその数が少ない^{(9)~(14)}。著者の一人と森⁽¹⁵⁾はすでに高炭素鋼、Cr-Mo 鋼について、深冷処理を施した場合の残留応力の大きさ、分布状態を調べた。その結果、油冷試料を深冷処理すると残留オーステナイトを減少し、硬度をかなり増加させるにもかかわらず、その残留応力は油冷試料の小さな応力値をあまり変化させないことを見出した。

この注目すべき事実が他の多くの高炭素合金鋼に現われ一般的事実であるか否かを知るために、今回はさらに多くの高炭素合金鋼を選んで、残留応力におよぼす深冷処理、焼戻の影響について調べた結果を報告する。

II. 試料および実験方法

試料は市販の軸受鋼(SUJ-2)と実験用に溶製した Mn 鋼, Mn-Cr 鋼, および Mn-Cr-Ni 鋼である。溶製鋼は空气中溶解(2 kg)し、鍛造、圧延、歪取り焼鈍、機械切削の工程を経て所定の寸法に加工した。その形状は 5.0 mmφ×70 mm の丸棒である。その化学成分を Table 1 に示す。

Table 1 Chemical compositions of test specimens.

Specimen	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
SUJ 2 steel	1.02	0.18	0.38	0.027	0.019	1.35	—	—
Mn-steel	1.20	0.73	1.02	0.006	0.017	—	—	—
Mn-Cr steel	1.21	0.70	1.41	0.007	0.016	1.02	—	—
Mn-Cr-Ni steel	1.21	0.70	1.41	0.006	0.017	1.03	0.95	—

熱処理は 800°, 830°, 900°, 950°C 各 15 分間真空炉中加熱後 17°C 水または油に撈拌焼入した。また深冷処理試料は常温まで冷却後ただちに液体空气中に急冷したものである。なお焼戻は 100°~600°C 各 1 時間保持である。残留応力は Heyn の方法により軸方向の応力を測定した。つまり 10% HNO₃ 水溶液を用いて、試料表面より腐食し、順次その時の半径および軸方向の長さの変化を 20°C の恒温室でコンパレータにて測定し、応力を算出した。なお応力測定と並行して硬度、磁気測定を行なった。

III. 実験結果と考察

1. 軸受鋼(SUJ-2)

Fig. 1 は軸受鋼を 950°C より各冷却方法で焼入した場合

- ** 東北大学金属材料研究所 (The Research Institute for Iron, Steel and Other Metals, Tohoku University, Sendai)
- *** 東京製鋼株式会社研究所 (Tokyo Rope Co., Ltd. Laboratory, Kanagawa)
- * 1963 年 4 月本会東京大会に一部発表
- (1) R. Mailander: Stahl u. Eisen, **51** (1931), 662.
- (2) H. Bühler and E. Scheil: Arch. Eisenhütt., **5** (1931-32), 413.
- (3) H. Bühler and E. Scheil: Arch. Eisenhütt., **6** (1932-33), 283.
- (4) H. Bühler and E. Scheil: Arch. Eisenhütt., **7** (1933-34), 359.
- (5) H. Bühler and E. Scheil: Arch. Eisenhütt., **8** (1934-35), 219.
- (6) 川口: 本誌, **9** (1945), 20.
- (7) 岩瀬, 佐野: 本誌, **13** (1949), 1, 3.
- (8) 佐野: 本誌, **13** (1949), 6, 8, 11.
- (9) 菅野, 阪本: 鉄と鋼, **36** (1950), 61, 58.
- (10) 今井, 大原: 鉄と鋼, **38** (1952), 561.
- (11) J.E. Campbell and H.O. McIntire: Iron Age, **172** (1953), 20, 185.
- (12) 藤沢: 本誌, **18** (1954), 509, 513.
- (13) 磯村, 佐藤: 本誌, **26** (1962), 745.
- (14) 磯村, 佐藤: 本誌, **25** (1961), 357, 360.
- (15) 今井, 森: 本誌, **25** (1961), 618.

合、直径方向を順次腐食した時の応力の解放に伴う軸方向の長さ変化を測定した一例である。水冷は油冷よりも軸

Fig.1より計算によつて求めた応力の分布状態を Fig.2に示す。水冷、油冷ともに応力の方向は同一であるが、その

Fig.1 Relation between the depth from surface and elongation of longitudinal direction in SUJ-2 steel, heated at 950°C for 15min and water, oil quenched and subzero treated.

Fig.2 Distribution of residual stress in SUJ-2 steel, heated at 950°C for 15 min, oil, water quenched and subzero treated.

Fig.3 Distribution of residual stress in SUJ-2 steel, heated at 830°C for 15 min, oil, water quenched and subzero treated.

方向の伸びは大きい、深冷処理を施してもその長さの変化には大きな影響を示さない。○印が深冷処理試料である。

Fig.4 Relation between hardness and temperature of hardening in SUJ-2 steel.

Fig.5 Relation between amount of retained austenite and temperature of heating in SUJ-2 steel.

大きさは著しく異なる。しかし水冷と水冷後深冷処理を施した試料とでは測定誤差内ではほぼ同一である。同様に油冷と油冷後深冷処理を施したものは類似し、その応力値はいずれも小さい。Fig.3は830°Cより焼入した場合の応力分布であるが、焼入温度を変えても、950°Cの場合と類似し、また深冷処理によつて残留応力値は大きく変らない。応力測定した試料の断面の硬度を Fig.4に示す。単に水冷したものは油冷したものよりも硬度は高く、焼入温度を830°Cから950°Cに上昇するとわずかに低下する。一方、これらの試料を深冷処理すると、焼入温度または水冷、油冷の別なく硬度は上昇し、約880 VHNを示す。Fig.5は磁化の強さより残留オーステナイト量を求めたものであるが

(17), 水冷, 油冷のままの硬度の低下は残留オーステナイト量にも関係して, 焼入温度が上昇すると多量に残留することを示している. 水冷, 油冷後それぞれ深冷処理を行な

うと, 残留オーステナイトは減少する.

これらの結果は著者の一人と森⁽¹⁵⁾の報告とはほぼ一致し, 軸受鋼においても焼入後の残留応力は常温までの冷却方法, つまり冷却速度によって変化するが, それ以後深冷処理を施しても大きな変化がないという興味ある事実を再認識できる.

2. Mn 鋼, Mn-Cr 鋼, Mn-Cr-Ni 鋼

水冷, 油冷によって残留オーステナイト量のかかなり多い Mn 鋼または Cr, Cr+Ni をそれぞれ添加した場合について, 前と同様, 深冷処理の影響を調べた. 全体として前述の軸受鋼と同じ傾向がみられる. Mn 鋼の残留応力分布を Fig. 6 に示す. 水冷試料は油冷試料よりも応力大きい. そして焼入温度を変えてもその残留応力はほとんど変化しない. また水冷のまま, 水冷後深冷処理したものとの応力は前と同様あまり変化しない. Fig.

Fig. 6 Distribution of residual stress in Mn steel, heated at 830°C and 950°C for 15 min, oil or water quenched and subzero treated.

Fig. 7 Distribution of residual stress in Mn-Cr steel and Mn-Cr-Ni steel, heated at 800°C or 900°C for 15min and oil, water quenched and subzero treated.

Fig. 8 Relation between hardness and temperature of hardening in Mn steel.

Fig. 9 Relation between amount of retained austenite and temperature of heating in Mn steel.

を Fig. 8, 9, 10, 11, 12, 13 に示すが, 前の軸受鋼, Mn 鋼と類似した傾向を示す. Fig. 12, 13 から Mn-Cr-Ni 鋼を

佐野⁽⁸⁾⁽⁹⁾らが Fe-Ni 合金を用いて調べ, 試料がより低温であるため弾性体であること, あるいは試料の内外部に起る

Fig. 10 Relation between hardness and temperature of hardening in Mn-Cr steel.

Fig. 12 Relation between hardness and temperature of hardening in Mn-Cr-Ni steel.

Fig. 11 Relation between amount of retained austenite and temperature of heating in Mn-Cr steel.

Fig. 13 Relation between amount of retained austenite and temperature of heating in Mn-Cr-Ni steel.

900°Cより油冷すると, 残留オーステナイト量は約43%を示し, 硬度も800°C焼入と比べると低下している. しかしながら, 深冷処理によって残留オーステナイトの減少と硬度の上昇がみられる. 一方 Fig. 7 に示すごとく応力分布はこの深冷処理によって大きな変化は認められない. 合金元素として Mn 以外に 1.02% Cr, 1.03% Cr+0.95% Ni をそれぞれ含有する鋼の Ms 点の変化を示す実験式⁽¹⁸⁾, (1) 式を用いて計算すると

$$\begin{aligned} \text{Ms}^{\circ}\text{C} = & 538 - 317 (\% \text{C}) - 33 (\% \text{Mn}) - 28 (\% \text{Cr}) \\ & - 17 (\% \text{Ni}) - 11 (\% \text{Si}) - 11 (\% \text{Mo}) - 11 (\% \text{W}) \end{aligned} \quad (1)$$

110°, 74°, 52°C と合金元素の添加により Ms 点が低下するが, 残留応力分布にほとんど差異がみられない. したがって合金元素の添加によるこの程度の Ms 点の変化から残留応力はあまり影響されない.

深冷処理によって残留応力値が大して変化しないことは

(18) Metals Handbook: ASM, (1948), 611.

変態の時間的ずれが少ないことを提案している. この研究に用いた高炭素合金鋼では深冷処理によって Fe-Ni 合金ほど詳細な変化はみられなかった. しかし硬度および残留オーステナイト量の変化は主として焼入温度, あるいは深冷処理の有無に大きく関係している. これらの変化と残留応力分布を見ると, この範囲の残留オーステナイト量の変化によって残留応力は大きく変化しない. したがって残留応力分布は常温までの冷却速度にかなり影響する. つまり残留応力の大小を決定する直接の因子は残留オーステナイト量でなく, マルテンサイト変態の生起速度によるものと考えられる. すなわちマルテンサイト温度範囲の冷却速度に主として支配されるものと推察する.

3. 焼戻の影響

水冷, 油冷ならびに深冷処理試料の焼戻による残留応力の変化は焼戻温度上昇にしたがって残留応力が次第に減少

することはすでに知られている⁽¹⁵⁾。しかし鋼種、試料の形状などによつて減少の割合は異なるため⁽¹⁹⁾⁽²⁰⁾、残留オ

Fig. 14 Distribution of residual stress in SUJ-2 steel, oil quenched from 830°C, water quenched from 950°C and tempered at several temperature.

Fig. 15 Change in the max residual stress, hardness and magnetic intensities of SUJ-2 steel with tempering temperature.

Fig. 16 Change in the residual stress, hardness and magnetic intensities of Mn-steel with tempering temperature.

ーステナイト量の異なる軸受鋼と溶製した Mn 鋼の 2 種について焼戻による応力の解放状態を調べた。

Fig. 14 は軸受鋼を 950°C 水冷または 830°C 油冷した後、各温度 1 時間の焼戻による応力の変化を示した。焼戻温

度が上昇するにつれて、残留応力は減少し約 600°C でほとんど解消する。830°C 油冷試料はその残留応力値が小さいため、詳しい点を確かめられなかつた水冷の場合とはほぼ同じ挙動を示すものと考えられる。そして、マルテンサイトの分解はあつても残留オーステナイトの変態が開始される以前の温度、200°C 焼戻で応力の大きい解放があることは注意を要する。これはマルテンサイトから炭化物の析出が主原因と考えられる。焼戻による試料表面部の引張最大応力値の変化、硬度または飽和磁化の強さの変化を Fig. 15 に示す。焼戻温度上昇につれて、硬度は漸次減少し、飽和磁化の強さは約 300°C を超えるとほぼ一定になる。この温度までに残留オーステナイトの分解が完了し残留応力は著しく減少させるが、600°C において完全に解消する。Fig. 16 は Mn 鋼についてみたものであるが、残留オーステナイトの分解が高温にわたるという外は軸受鋼の場合とまったく同様の变化を示す。

IV. 結 言

各高炭素合金鋼について Heyn の方法により油冷、水冷またはその後それぞれ深冷処理を施した時の残留応力を測定して、残留応力によぼす深冷処理、焼戻の影響を調べた結果を要約するとつぎの通りである

(1) 水冷、油冷による残留応力は表面部が引張、内部にゆくにつれて圧縮応力の変態応力型を示し、従来の結果とよく一致する。焼入温度を γ 領域内で変えても応力の大きさ、分布に大きな影響をおよぼさない冷却方法、つまり水冷、油冷の冷却速度によつて大きく変わる。

(2) 常温まで冷却後、深冷処理を施した試料の残留応力をみると、常温までに生じた残留応力分布はこの処理によつてあまり変化しない。またこの事実は実験に用いたすべての試料に共通して興味ある事実である。一方硬度は上昇し、残留オーステナイトはかなり減少する。なおこれらの現象は現段階では十分説明されず、今後の実験とにまつところである。

(3) 合金元素として Cr, Ni, Mn 1% 内外添加しても残留応力分布はあまり変化がない。したがつてこの種の鋼の残留応力は Ms 点にあまり影響されないものと思われる。

(4) 焼入後各温度で焼戻すると 400°C で残留応力は相当減少し、600°C で完全に解消する。

(19) H. Bühler and E. Herrman: Arch. Eisenhütt., 27 (1956), 269.

(20) H. Bühler and M. Rojewski: Arch. Eisenhütt., 34 (1963), 485.