鋼の焼入による残留應力について (第2報)*

藤 澤 宮 次**

Miyaji Fujisawa : Residual Stresses of Quenching of Steel Cylinders (2nd Report).

In succession to the previous experiments, we have studied the influence of alloying elements (C, Ni, Cr), various heat-treatments and diameters of specimens on residual stresses of quenched Fe-base alloys by Heyn's method. The results with full hardening are as follows: Residual stresses of steels are closely related with their cooling dilatation curves. These are much influenced by the expansion caused by the transformation as the transformation point are depressed by the increase of alloying elements. Therefore, these are powerfully influenced by carbon contents. The residual stresses of alloying steel samples are markedly influenced by the carbon contents of austenite when these samples transform at lower temperature. For instance, the residual stress of 21 % Ni-Fe alloy samples are different from that of 1.1 % carbon steel samples in spite of resembling cooling dilatation curves, i.e. the effect of thermal stress is not apparently recognized in the residual stress of 21 % Ni-Fe alloy samples quenched from high temperature. But both the effects of thermal stress and transformation stress are clearly recognized in 1.1 % carbon steel samples quenched from the same temperature. Moreover, residual stresses of steel samples containing two or more alloying elements are similar to that of carbon steel samples of the same cooling dilatation curves if these steels contain 0.2 per cent or more carbon contents. Therefore, 0.2 per cent or more of carbon content of high alloying steel samples have a potent effect on susceptibility to cracking.

(Received December 2, 1954)

I. 緒 言

前報には主として高炭素工具鋼の焼入による残留應力におよぼす種々な熱処理の影響を述べた。完全に中心まで焼が入る場合、鋼の焼入による残留應力生起の過程は 1. 變態点までの熱収縮によるもの、2. 變態による膨脹によるもの、3. 變態後の熱収縮によるもの；に分けられるが、そ

れぞれの働きは熱処理条件によつて大いに異なることを知つた。従つて焼入による残留應力は Ar' 膨脹曲線に影響をおよぼす合金元素の量と種類によつて大いに異なるであらうと考えられる。

本研究は焼入による残留應力におよぼす合金元素の影響を明らかにする目的で、第1報と同様に Heyn の方法によつて、焼入れられた Fe-Ni 合金、Fe-Cr 合金、ニッケル鋼、クロム鋼の試料の残留應力を測定し、さらにそれらの實驗結果を炭素鋼の結果と比較検討したものである。

** 東京工業大學

* 1951 年 11 月本會神戸大會に發表。

II. 供試々料ならびに実験方法

この研究に用いた試料の化学成分は Table 1 に示す通

Table 1 Chemical analysis of specimens

	Chemical composition,						
	Ni %	21.3	13.0	7.1			
Ni-Fe alloy	Cr %	8.2	5.6	3.0			
Cr-Fe alloy							
Carbon as impurity in these specimens ranged from 0.02~0.06							
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
C-Steel	1.15	0.25	0.34	0.023	0.010	—	—
Ni-Steel	0.19	0.23	0.41	0.020	0.012	15.5	—
Cr-Steel	0.12	0.28	0.42	0.016	0.013	—	12.24

Fig. 1 Influence of alloying elements on residual stress in Fe-base alloys quenched from 900°.

て測定した

III. 実験結果

1. 合金元素量の影響

900°より水焼入した結果を Fig. 1 に示す。Fe-Ni 合金、炭素鋼ともそれぞれ Ni 量、炭素量が増加し、変態点が降下するに従つて熱應力の外に変態應力の影響力が大きく現われて来た。その変態應力の影響は僅かの炭素量の増加で著しく、その Ar'' 変態点を降下するところの炭素鋼において特に大きい。既に 0.3 % 炭素量でその影響が窺えた。Fe-Cr 合金では変態点の降下によらず影響は Ni よりやゝ大であるが、この範囲の Cr 量では変態の影響はあまり認められなかつた。

上記の実験結果において特に注目すべきことは Ar'' 膨脹曲線の比較的類似している 21 % Ni-Fe 合金と、1.1 % C 炭素鋼の残留應力の結果のみに著しい相違が認められることである。

2. 21 % Ni-Fe 合金および 1.1 % 炭素鋼

(1) 焼入温度の影響

950°に 30 分加熱後急速に各焼入温度に達せしめ、その温度にそれぞれ 15~20 秒に保持し、圖の各温度になつた均一オーステナイト組織のものを水焼入した結果を Fig. 2 に示す。

Ms 点直上の温度からの水焼入では共に外層に最大の引

Fig. 2 Influence of quenching temperature on residual stress in 21%Ni-Fe alloy and 1.15% C-steel.

張應力が残留した。炭素鋼ではさらに焼入温度が高くなるに従い、変態点までの熱収縮によつて最外層の引張り應力は減少し、遂に圧縮應力が残留するようになる。Ni-Fe 合金では僅かに外層の引張り應力値が減少するにとどまる。

Fig. 3 Influence of diameter on residual stress in 21%Ni-Fe alloy and 1.1 %C-steel quenched at 900°.

Fig. 4 Influence of quenching temperature on residual stress in various alloys.

次に Ms 点以下の温度にもち来し、一部マルテンサイト変態を行わせたものをさらに水焼入する。炭素鋼ではその焼入温度が Ms 点より僅か低下する (120°) だけで、Ms 点直上より焼入した 160° の場合に比較し残留応力は急激に減少した。Fe-Ni 合金でも同様な傾向が 190° の場合と 220° の場合に見られるが炭素鋼の場合ほど顕著でない。

(2) 試験片の直径の大きいさの影響

900° より水焼入せる結果を Fig. 3 に示す。21 % Ni-Fe 合金では直径の大きいさにかかわらず、外層に引張応力、内層に圧縮応力が残留しいわゆる変態応力型を示し熱応力の影響は認められない。外層の引張応力は直径が 7 mm までは急激に大きくなり、その値も炭素鋼よりやや大きい。これに反し 1.1 % 炭素鋼は直径が 5 mm の場合には外層に引張応力、内層に圧縮応力が働く変態応力型を示しているが、7 mm 以上では熱応力の影響顯著になり変態応力と熱応力の重疊せられた如き残留応力型を示した。炭素鋼のこの外層部の圧縮応力および引張応力は直径とともに大きくなり、遂に割れを生ずるに至つた。

3. 合金中の炭素量の影響

21 % Ni-Fe 合金と類似の Ar'' を示す Table 1 の如き成分のニッケル鋼およびクロム鋼を作り同様な実験を行つた。焼入温度の影響および試験片の直径の影響をそれぞれ Fig. 4 と Fig. 5 に示す。クロム鋼の結果は 21 % Ni-Fe 合金の結果に近いが、ニッケル鋼の結果は極めて 1.1%炭素鋼に似た結果を示した。それ故 C, Ni, Cr 等 2 種以上の合金元素が存在するとき炭素量が 0.2 % 以上あれば、それと同じような Ar'' 膨脹曲線を示す炭素鋼の結果に極めて類似した残留応力を示すものと考えられる。

4. ニ三の實用鋼材

實用特殊鋼の如く、たとえば軸受用鋼 (0.95 % C, 1.6 % Cr) および Cr-Mn 鋼 (0.48 % C, 0.87 % Cr, 0.80 % Mn) はそれと類似の Ar'' 膨脹曲線を示すそれぞれ 1.1 % および 0.6 % 炭素鋼と極めて似た残留応力を示すことは第 1 報において述べた。こゝではさらに 13 クロム不銹鋼について同様な実験を行つたところ、第 1 種 (0.12 % C, 13 % Cr) は Ar'' および焼入の残留応力も 21 % Ni-Fe 合金の結果に近いが、第 3 種 (0.25 % C, 13 % Cr) は 1.1 % 炭素鋼の如く焼割れを生じた。

IV. 考 察

實驗結果によれば、焼入による残留応力は熱處理條件によつて異なるばかりでなく、合金元素の量およびその種類によつて大いに異つた。

すなわち実験した範囲の元素量においては元素量の増加による変態点の降下および変態による膨量の増加によつて、熱応力型の残留応力に変態応力の影響が顕著にあらわ

比較的類似の Ar'' 熱膨脹曲線を示す鋼の内ニッケル鋼 0.2% C, 15.5% Ni) および軸受用クロム鋼は炭素鋼に近い残留応力値を示した。従つて C, Ni, Cr 等 2 種以上

Fig. 5 Influence of diameter on residual stress in various alloys quenched from 900°.

れた。その効果は変態点を著しく降下する炭素が最も大であつた。

かくの如く焼入による残留応力は合金元素が Ar'' 膨脹曲線におよぼす影響と密切な関係がある。ところが Ar'' 膨脹曲線が類似している場合、高温より水焼入した比較的低ニッケル合金 (13% Ni) の残留応力は炭素鋼の残留応力と同様に変態応力の外に熱応力の影響が顕著に認められたが、21% Ni-Fe 合金と 1.1% 炭素鋼の残留応力は極めて異り、残留応力におよぼす焼入温度および試料の直径の影響が両者では非常に異つていた。たとえば高温より水焼入された 21% Ni-Fe 合金では主として変態応力の型を示し、変態点までの熱収縮の影響があまり認められない。しかし炭素鋼では変態応力の外に熱応力の影響が顕著に認められ、両応力の重疊した如き残留応力型を示した。また試験片の直径が大きくなるに従つて 21% Ni-Fe 合金では直径の大きさにかわらず残留応力の分布は変態応力型を示し、熱応力の影響は少い。かつ表面の引張応力値は直径が 7 mm までは急激に増加するがそれ以上の直径ではあまり變らない。これに反し 1.1% 炭素鋼では直径の増大とともに熱応力の影響および変態応力の影響がともに大となり遂に焼割れを生ずるにいたつた。

このように焼入による残留応力は Ar'' 膨脹曲線が類似していても合金元素の種類によつて異なることがあり、特にマルテンサイト変態点の低い場合には 21% Ni-Fe 合金と 1.1% 炭素鋼にみられた相違があるので注意せねばならぬ。しかし 21% Ni-Fe 合金および 1.1% 炭素鋼と

の合金元素が存在するとき、これらの合金鋼の焼入による残留応力はオーステナイト中の炭素濃度によつて大いに影響される。このことは合金鋼の焼入に際して、特に注意せねばならぬことである。それ故オーステナイト中の炭素濃度が 0.2% 以上ある Ar'' 膨脹量の大きい高合金鋼では、炭素鋼と同様焼割れを生じ易いものとして熱処理を考慮せねばならぬであらう。

V. 結 語

一般に焼入による残留応力は熱処理条件によつて異なるばかりでなく、合金元素の量およびその種類によつて大いに異なる。

実験せられた範囲の合金元素量の試料を高温より水焼入せる場合、Fe-Ni 合金および炭素鋼の残留応力はそれぞれ Ni 量、炭素量が増加し、変態点が降下するに従つて熱応力の外に変態応力の影響が大きく現れる。その内変態応力の残留応力におよぼす影響は僅かの炭素量の増加で著しく、その Ar'' 変態点を降下する炭素鋼において特に大きくあらわれる。

次に Ar'' 膨脹曲線が類似している場合、低 Ni-Fe 合金では炭素鋼と類似な残留応力を示すが、マルテンサイト変態温度の低い高合金鋼では、オーステナイト中の炭素濃度によつて残留応力が異なる。たとえば高温より水焼入された 21% Ni-Fe 合金の残留応力は変態応力型を示すが、1.1% 炭素鋼では変態応力型と熱応力型の重疊せられた如き残留応力型を示し、両者に著しい相違が認められた。しかし C, Ni, Cr 等 2 種以上の合金元素が存在するとき、オーステナイト中に 0.2% 以上の炭素量を有する高合金鋼はその合金鋼と類似の Ar'' 膨脹曲線を示す炭素鋼に似た残留応力を示した。従つてオーステナイト中の炭素濃度が 0.2% 以上ある Ar'' 膨脹量の大きい高合金鋼は焼割れを生じ易いものとして熱処理を特に考慮せねばならぬ。

終りに臨み種々なる御教示を賜つた指導教官山田良之助先生に厚く御禮申げる。また試料の熔解を御願ひした日特の玉置研究部長、日本冶金の策研究課長に謹んで感謝の意を捧げる。