恒温保持中に加えた引張りおよび圧縮応力が 残留オーステナイト量におよぼす影響*

金 沢 正 午**

Shogo Kanazawa : Effects of Tensile and Compressive Stress Applied During Holding Steels Isothermally on the Amount of Retained Austenite. It is well known that when steel is hot-quenched to the temperature range of lower bainite formation and is partially transformed isothermally the residual austenite is stabilized and austenite (γ_R) retained at room temperature is increased. In the previous reports⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾, however, the author indicated the existence of the effect of stress on the formation of martensite nuclei in addition to the hitherto known effect of stress on the driving force of martensite transformation, and assumed the coherent embryos of martensite formed due to Bain's strain to explain the opposite effect of tension and compression upon the transformation. In the present study, the author investigated how austenite is stabilized when steel is held isothermally in the temperature range of unstable austenite under the load of tension or compression. The experimental results obtained were as follows: (1) When samples of steel were held in incubation time, there was no change in the amount of γ_R irrespective of the holding temperature and the application of stress of positive or negative sign. Therefore this substantiated the results obtained in the previous report that "the amount of γ_R was dependent upon the temperature range in which the stress was applied." (2) In the bainite temperature range the incubation time was shortened as a result of shear stress effect irrespective of its sign. At room temperature, however, tensile stress increased γ_R and compressive stress decreased γ_R (as in the case of stress effect during continuous cooling disclosed in the previous report), owing to the opposite effect of stresses, depending on whether the sign is positive or negative, and on the number of nuclei formed after holding the samples for a certain time. Thus

** 富士製鉄株式会社中央研究所 (Fuji Iron & Steel Co., Central Laboratory, Kanagawa)

* 1956年10月本会戸畑大会に一部発表; オーステナイトの安定化におよぼす冷却中の応力の影響 (第4報)

it was confirmed here again that there was an effect of stress on the number of martensite nuclei.

(Received January 13, 1962)

I. 緒 言

前報⁽¹⁾⁽²⁾において、高炭素合金鋼のマルテンサイト変態において、その T_c 温度以下の引張応力は残留オーステナイト (以後 γ_R と記す) を増加せしめ、一方圧縮応力は逆に γ_R を減少せしめること、さらにその応力の効果は M_s 点に特別関係なく、 γ_R は応力を受けつつ降下する“温度の巾”によつて定まるといふ実験結果を述べた。これらの現象は従来のマルテンサイト変態に対する応力理論よりは説明ができないことから、前報⁽³⁾においてマルテンサイト変態過程に対する実験を行ない、従来の変態の駆動力に対する応力作用の他に、核発生に対する応力作用が存在することを推論し、応力の正負による反対作用はマルテンサイトの coherent embryo の生成に伴う“Bainの歪”に基づくものとして説明した。

一方鋼を下部ベイナイト域の温度に hot quench し、その温度に恒温保持して一部ベイナイトを生ぜしめると、残りの γ が安定化し、従つて常温の γ_R が増加することは Steinberg⁽⁴⁾ 以来、Triano⁽⁵⁾、Cohen⁽⁶⁾、今井⁽⁷⁾らにより報告されている。Cohenはこの原因として一部ベイナイトの発生によりマルテンサイトの embryo が食われること、また比較的高温に保持されるためいわゆる熱的安定化 (マルテンサイトの embryo の減少) が生ずるものと考えている。また Trianoはこの安定化した γ は組成的には、何等変化を生じていないことを確かめている。

以上のことから、不安定 γ 域で引張または圧縮応力を与えつつ incubation time 以内で恒温保持した場合、あるいは一部ベイナイト変態を生ぜしめた場合、どのような γ の安定化が生ずるかは、前報⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾の実験結果および理論と関連して検討すべき問題と考えた。本報はこれに関する実験結果、およびそれに対する著者の考察を述べたものである。

II. 試料および実験方法

引張試片は 5 mm ϕ $\times$ 100 mm、圧縮試片は 9 mm ϕ $\times$ 60 mm である。恒温引張りには前報で用いた 400 kg 重錘式引張試験機を用い、チャック部はあらかじめ塩浴炉中に浸漬した。すなわち 950°C で所定の時間 t 化した試片をすばやく所定の温度の塩浴中に急冷し、試片が塩浴の温度に達してから (30 秒保持) 所定の引張荷重を与え、一定時間保持

後、荷重をはづして空冷した。恒温圧縮では上記の装置を用いることは困難であつたので、まず所定の温度の塩浴中に急冷し、30 秒保持後、あらかじめ所定の温度に保持しつつ 500 kg アムスラー試験機にとりつけてある電気炉中に急速にセットし、ただちに圧縮荷重を与えた。 γ_R の測定法は先報⁽²⁾と同じであるが、incubation time の測定のために試片中央断面の検鏡も行なつた。用いた試料の化学成分 (先報⁽¹⁾⁽²⁾とはほぼ同じ) は Table 1 に示した。

Table 1 Chemical composition of specimens.

Elements	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
Steel							
A	0.97	0.23	0.61	0.021	0.024	0.07	2.81
B	1.02	0.21	0.49	0.019	0.026	4.96	0.07
C	0.54	0.39	0.65	0.023	0.031	5.01	0.04

III. 実 験 結 果

1. Incubation time 以内での荷重の影響

A 鋼を用い incubation time 以内の時間で、260°C (T_c 温度以上)、180°C (T_c と M_s 温度の間)、および 100°C (M_s 温度以下) の 3 点における引張および圧縮荷重の影響を調べた。その結果はいずれの場合も無荷重の場合と全く同様に引張応力、圧縮応力ともに γ_R は何等の変化を示さなかつた。Fig.1 と Fig.2 は 180°C における実験の一例とし

Fig.1 Effect of isothermal tensile stress on retained austenite ($T_c \sim M_s$).

Fig.2 Effect of isothermal compressive stress on retained austenite ($T_c \sim M_s$).

て示したもので、 γ_R は無荷重で、また恒温保持することなく 950°C よりそのまま室温まで空冷した場合の γ_R に対する差 $\Delta\gamma_R$ で表わしてある。 M_s 以下で保持した 100°C の場合には、熱的安定化のために γ_R は時間とともに増加を示したが (図は省略)、しかし荷重の有無による差は全く認められなかつた。さらに B 鋼についてもこれと同様の実験を行なつたが、その結果は A 鋼の場合と全く同じであつた。

(1) 萩原、金沢、熊田：本誌，23 (1959)，299.

(2) 萩原、金沢、熊田：本誌，23 (1959)，735.

(3) 萩原、金沢：本誌，25 (1961)，213.

† 焼入冷却途中に応力を加えた場合、マルテンサイト変態に対して応力の有効温度範囲が存在したが、その応力効果が生じる上限の温度を T_c 温度とした。

(4) S.S. Steinberg: Arch. Eisenhütt., 7 (1946)，537.

(5) T. Lyman and A.R. Triano: ASM, 37 (1946)，402.

(6) M. Cohen: ASM, 41 (1949)，.

(7) 今井：本会第 7 分科会報告，11 (1947)，9.

このことは先報⁽²⁾でのべた“ γ_R に対する応力効果は、応力を受けつつ降下する温度の巾によつて定まるものであり、一時的に応力または変形を与えても効果は少ない”ということをよく裏づけている。また、恒温荷重により試片は当然塑性変形を受け、たとえば Fig. 1 の 180°C-10 kg/mm² で約 1.4% の伸びを示しているのであるが、加工による γ_R の増加は示しておらず、先報で述べたところの γ_R の増減が加工硬化によるものとは別個のものであることが再確認された。

2. 一部変態を生じた場合の荷重の影響

Fig. 3, 4 は A 鋼の 300°C 保持の場合の引張荷重の影響である。Fig. 3 は保持時間と $\Delta \gamma_R$ との関係であるが、点線では

Fig. 3 Effect of isothermal tensile stress on retained austenite.

Fig. 4 Effect of isothermal tensile stress on percentage of structures at room temperature.

示したのは再現性の検討のため、時期を全く別にして同様の実験を行なった結果で、図の如く両結果はよく一致を示している。さて無荷重の場合、約 40 分までは γ_R の変化はないが、これ以降において γ_R は明瞭な増加を来し、60 分で最大となり、以降の時間で順次減少している。一方、引張荷重を与えつつ恒温保持した場合は、いずれも約 20 分から γ_R の増加を来し、さらに 60 分においては 5 kg/mm² では無荷重の場合の約 2 倍、10 kg/mm² では約 3 倍の顕著な増加をするという特異な現象を示し、以下無荷重の場合と同様に順次減少している。Fig. 4 はこれらの

関係を保持時間と常温における組織の百分率との関係で示したものである。図において無荷重の場合の incubation time が 48 分であるのに対し、5 kg/mm² では 41 分、10 kg/mm² では 36 分に短縮されている。拡散変態に対する応力の影響については本号の別報⁽¹¹⁾で詳述するが、ベイナイト変態では α 変態が先に生成すると考えられており、したがってベイナイト核はマルテンサイト核と同じものと見てよく、さらに incubation time とはその既存核中の最大核が臨界核に発達する時間で、その時間内では新たな核の発生はないと考えられているから、ここに荷重による剪断応力効果が働き、臨界核への発達を助成し、incubation time の短縮が行なわれたものと考ええる。一方 γ_R もベイナイトの生成とともに、さらにまた引張応力の大きさとともに顕著に増加している。ここで incubation time はベイナイトが約 1% 明瞭に析出した時間をもつて決定したので、実際はこれより以前に徐々にわづかの析出は開始しているものと考えられる。従つて γ_R の増加の開始の時間は、応力の有無にかかわらずベイナイトの生成開始時間にはほぼ近いものと見てよく、これは Steinberg らの結果と一致する。

一方ベイナイト変態が始まると、その変態生成量に依じて当然残りの γ は減少するが、その“減少した γ ”に対する室温の γ_R の生成率を Fig. 4 より求めたのが Fig. 5 である。これによると、無荷重の場合は γ_R はある極大を経て減少に移っているが、引張荷重の場合は、Fig. 4 と同じく

Fig. 5 Effect of isothermal tensile stress on "retained austenite/untransformed austenite".

応力の大きさに応じて γ_R の増加を来すとともに、極大は示さずに 60 分保持以降では殆んど変化しない興味ある結果を示している。

以上の如く、恒温保持の場合、引張応力はベイナイトの生成以前は γ_R に変化を与えないが、ベイナイトが生成すると、前報の冷却途中の場合と同様に以後のマルテンサイト変態を阻止し、室温における γ_R を増加せしめることが判つた。

つぎに以上の実験と全く同様のことを、圧縮応力について行なった結果が Fig. 6~8 である。これらの図に示す如

く、前報の冷却途中における引張り、および圧縮応力効果と同じく、恒温保持して一部ベイナイトを生成せしめた時

Fig. 6 Effect of isothermal compressive stress on retained austenite.

Fig. 7 Effect of isothermal compressive stress on percentage of structure at room temperature.

Fig. 8 Effect of isothermal compressive stress on "retained austenite/untransformed austenite".

も、引張応力とは全く逆に圧縮応力では r_R を減少せしめることが明瞭に示されている。ただその減少率は引張応力の場合の増加率に比べて少なくはなっているが、ベイナイトの一定析出量に対し応力の有無により r_R 量が異なること、さらにある保持時間で r_R が極大を示すことなどは引張りの場合と同じであつた。また Fig. 7 に示した如く、圧縮応

力によつても引張りの場合とはほぼ同じく応力の大きさに応じて incubation time を短縮せしめることが判つた。これは前にも述べた如く、応力による incubation time の短縮は、既存の最大核が剪断応力効果により臨界核へ発達することを助長された結果によるものであるから、このことは引張りでも圧縮でも同様な剪断応力効果が生ずることにより説明される。

つぎに同じく A 鋼について 500°C に保持し、これに引張荷重および圧縮荷重を加えた時の保持時間と、各組織の百分率との関係を示したのが Fig. 9 および Fig. 10 である。500°C 保持で生ずる変態生成物は上部ベイナイトであるが、この場合は荷重の有無あるいは正負にかかわらず、300°C 保持の場合の如き r_R の極大は示していない。しかし図より明らかな如く、わずかではあるが、300°C の場合

Fig. 9 Effect of isothermal tensile stress on percentage of structures at room temperature.

Fig. 10 Effect of isothermal compressive stress on percentage of structures at room temperature.

と同様に引張応力では r_R の増加を、圧縮応力では r_R の減少を示し、ここでも応力の正負による逆現象を明瞭に示している。

以上、恒温保持して一部変態生成物を生ぜしめた場合の引張応力、および圧縮応力の影響について実験したが、この場合も変態生成物が下部あるいは上部ベイナイトの如何にかかわらず、前報で述べた冷却途中における応力効果と同様に、引張応力では γ_R の増加を、圧縮応力では γ_R の減少を来たことが判つた。

IV. 考 察

さて、以上の如き恒温保持中における引張応力と、圧縮応力の室温における残留オーステナイト量に対する差異の原因について考察してみると、つぎのようである。

(1) ベイナイト変態の incubation time 以内では、単に既存の最大核が臨界核へ成長することのみが生ずるだけで、ここでは新たな核の発生はないものと従来考えられている。従つて incubation time 以内で恒温保持した場合、応力の有無、あるいは応力の正負によつて γ_R が変化しない結果が説明できる。

(2) ベイナイト変態核はマルテンサイト変態核と同じであるから、ベイナイト変態の incubation time が応力により短縮されることについては、既存の最大核が臨界核に成長することに対する剪断応力効果のためであり、従つて引張応力でも圧縮応力でも同じであり、これは従来の応力理論に従うものであることは前に述べた通りである。最近 Porter⁽⁸⁾らは、ベイナイト変態が応力によつて促進される最低限の応力があることを示して、塑性変形によつて結晶粒界その他の障害物に堆積した転位の応力場が、核生長速度の増加を与えるからであるとしているが、従来の応力理論においても、マルテンサイトまたはベイナイトの生成は機械的ひきや双晶変形などと同様に、塑性変形の一種と考えるのであるから、弾性限以上の応力が有効に作用することは当然であり、incubation time の応力効果に対し敢えて転位の堆積を考える必要はないのではなからうか。

(3) 応力が incubation time 以後における恒温的変態に対して、如何なる影響をおよぼすかについては、その恒温変態全期間についての応力の影響を別報⁽¹¹⁾で詳述することにし、本報では前記(2)で述べた如き変態初期に対する影響だけにとどめる。

incubation time 以上の保持時間における γ_R に対する応力効果について考えると、Ms 点(約 150°C)に比べて高い温度、すなわち本実験の場合の如く 300°~500°C の温度で恒温保持されると、熱揺動により既存のマルテンサイトの embryo が活性化され、一定の伏倍期を経てマルテンサイト核へ生長することは起り得るであろう。今井ら⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾も恒温マルテンサイト変態の発生過程についてこれに

近い考えを述べている。熱揺動により embryo → マルテンサイト核の生長の生ずる伏倍期と、ベイナイト変態の incubation time との関係は、その温度あるいは合金成分により異なるではあるが(本実験および Steinberg らの結果では両時間はほぼ同じであるが、今井らは前者の時間の方が短い結果を報告している)、いずれにしても、ある保持時間後ではベイナイトの生成および embryo → マルテンサイト核の 2 種類の反応が生ずるであろう。従つて (A) 一定伏倍期後 embryo より生長するマルテンサイト核は、熱揺動により次第にその数を増す(ただし本試料では臨界核への生長は恒温的には生じない)。(B) 一方、ベイナイトの生成により既存の核が食われて減少する反応も生ずる。無荷重における変態初期後の γ_R の一時的増加は、(B)の原因による核数の減少であり、その後の減少は(A)の原因による核数の増加のためとして理解される。一方、引張りまたは圧縮応力が付加されると、(A)の反応に前報⁽³⁾の理論、すなわち引張応力は embryo → マルテンサイト核の反応を阻止し、圧縮では逆に促進する考えが適用され、結局(A)と(B)との組合せにより、上に述べた如き実験結果が得られたものとして説明される。

V. 総 括

鋼を下部ベイナイト域の温度に hot quench し、その温度に恒温保持して一部ベイナイトを生ぜしめると、残りの γ が安定化し、室温における γ_R が増加することがすでに知られている。一方、著者は前報⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾においてマルテンサイト変態に対する冷却途中の応力効果について一連の実験を行ない、引張応力と圧縮応力とでは γ_R 量に対して全く逆の作用が存在することを見出し、従来のマルテンサイト変態の駆動力に対する応力作用の他に、核の発生に対する応力作用が存在することを述べた。本報は以上のことにかんがみ、応力を与えつつ恒温保持した場合、 γ_R に対してどのような応力効果が生ずるかについて実験を行なつたもので、大略つぎの如き結果を得た。

(1) incubation time 以内における恒温保持では、応力の有無あるいは応力の正負によつても γ_R は変化しない。このことは応力の効果はその間に温度降下が必要であるとす先報⁽²⁾の実験を再確認するものである。

(2) ベイナイトの incubation time は、剪断応力効果により引張り、圧縮両応力によりほぼ同程度に短縮される。

(3) incubation time 以上における恒温保持の場合、前報の冷却途中における応力効果と同じく、引張応力は γ_R の増加を、圧縮応力は γ_R の減少を示した。このことも前報で述べたマルテンサイトの核数に対する応力効果の理論から統一的に説明される。

最後に本実験は著者が北海道大学工学部に在職中、萩原巖教授の御指導の下で行なつたものであることを付記し、ここに同教授に深く謝意を表します。

(8) L.F.Porter, P.C.Rosenthal: Acta Met., 7 (1959), 504.

(9) 今井, 泉山: 本会秋期講演大会概要, (1960), 59.

(10) 泉山: 本会秋期講演大会概要, (1960), 58.

(11) 金沢: 本誌, 26 (1962), 562.