オースフォーミングによるマルテンサイト 強化機構に関する一考察

五弓勇雄* 木原諄二* 岸 輝雄**

Isao Gokyu, Junji Kihara and Teruo Kishi: The Strengthening Mechanism of Aus-formed Martensitic Steel. A number of investigations have been performed on the strengthening mechanism of ausformed martensite, and the following mechanisms have been proposed:

- (1) Direct transfer of work-hardening structure from austenite to martensite.
- (2) Dispersion hardening due to micro carbide precipitation.
- (3) Decrease of martensite-plate size.
- (4) Decrease of residual austenite.
- (5) Production of twined martensite.

In this investigation, 4340-steel is ausformed in the metastable austenite-temperature range at high strain rates ($10^2 \sim 10^3$ /sec) by a counterblow forging tester, and the flow stress of the ausformed austenite at the working condition and the hardness of the ausformed martensite are measured. The following relation is obtained:

$$M_H = M_H^0 + 3 A \sigma,$$

where M_H is Vickers' hardness of the ausformed martensite, $A \sigma$ is the flow stress of the ausformed austenite at the ausforming condition and M_H^0 depends on both the chemical compositions and the pre-thermo-mechanical history of specimens. The factor, 3, of $A \sigma$ represents that the work hardening is directly transferred from austenite to martensite. On the basis of detailed discussions, it is concluded that the strengthening mechanism of the ausformed martensite is a direct transfer of work hardening and the other mechanisms mentioned above have a secondary effects. Especially, the hardening due to micro-carbide precipitation does not contribute essentially to the ausform-strengthening of martensite.

(Received May 16, 1967)

I. 緒 言

鋼のマルテンサイトの強度がオースフォーミングによって改善されることについて、これまで多くの研究がなされて来た⁽¹⁾。このオースフォーミングのマルテンサイト強度上昇の機構については、(1)加工硬化説、(2)析出物説、(3)

マルテンサイト微細化説、(4)残留オーステナイト減少説などがあるが、主として(1)か(2)が問題となる。加工硬化説は、オーステナイトが加工硬化しただけ、マルテンサイトに受けつがれ、強度上昇するというのであり、析出物説はオーステナイトが加工されるとき、たとえば M_6C_{23} のような炭化物が析出することにより、それがマルテンサイトに受けつがれて強度上昇をもたらすという考え方である。

著者らは、4340 鋼を相対鍛造機⁽²⁾を用い、オースフォーミングした結果、オースフォーミングによるマルテンサ

* 東京大学工学部冶金学科 (Department of Metallurgy, Faculty of Engineering, University of Tokyo, Tokyo)

** 東京大学大学院 (Graduate Student, University of Tokyo, Tokyo)

(1) G. Thomas, D. Schmatz and W. Gerberich: *High Strength Materials*, edited by V.F. Zackay, (1964), 251.

(2) 五弓, 木原: 塑性と加工, 3(1962), 825.

イトの強化はオーステナイトの加工硬化がマルテンサイトに受けつがれる“加工硬化説”によつて説明されるべきであるという結論に達したので報告する。

II. 実 験

1. 実 験 試 料

実験試料は 4340 鋼 (JIS SNCM 8) であるが、溶解ロットの違い、熱および加工履歴の違いで Table 1 のように 3 種類となつた。

Table 1 Chemical compositions and thermo-mechanical history.

Sample	Chemical composition (wt %)								Thermo-mechanical history
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	
A	0.40	0.32	0.78	0.013	0.010	1.76	1.00	0.21	12 mm ϕ hot forged, 900°C $\times$ 1 hr annealed
B	0.37	0.25	0.74	0.011	0.011	1.79	0.76	0.23	13 mm ϕ hot forged, 800°C $\times$ 30 min annealed 10.5 mm ϕ cold swaged 800°C $\times$ 30 min annealed 9.5 mm ϕ cold drawn
C	"	"	"	"	"	"	"	"	13 mm ϕ hot forged, 900°C $\times$ 1 hr annealed in vacuo

これらの試料から、A と C 試料の場合には 10 mm ϕ $\times$ 10 mm, B 試料の場合には 9.5 mm ϕ $\times$ 10 mm の試片を切り出した。

2. 実 験 方 法

オーステナイト化温度に設定した炉で試片をオーステナイト化した後、加工温度に設定した鉛浴またはビスマス-鉛浴に Quench し、それから加工温度に設定した鍛造炉中に移し、相打鍛造した。鍛造後、所定時間保持して、水焼入れした。硬度はビッカース硬度計とマイクロビッカース硬度計を使用した。

変形中の flow stress は文献 (2) にある方法、すなわち、ハンマーに貼布した抵抗線ひずみ計で荷重を、ハンマーの腕にとりつけた平行板コンデンサの容量変化によつて変位を測定した。

III. 実 験 結 果

Fig.1 は、オースフォームした後焼入れ、マルテンサイトにしたものの硬度とオーステナイト化温度との関係である。焼戻し温度が 200°C の場合も 300°C の場合にも、オーステナイト化温度が高いほど、硬度は低くなつていくことがわかる。

Fig.2 は、オースフォームする前にオースフォーミング温度に保持する時間と、焼入れ後の硬度との関係である。この図から保持時間は焼入れ後の硬度に影響しないことがわかる。

Fig.3 は、オースフォームをした後、オースフォーミング温度に保持する時間と、焼入れ後の硬度との関係である。この図から保持時間は、焼入れ後の焼戻し温度が 200

°C であつても 300°C であつても、ほとんど硬度に影響していないことがわかる。ただ、保持時間の長い方がやや硬度が低くなる傾向が認められる程度である。

Fig.4 はオースフォーミングの加工度と焼入れ後の硬度との関係を示している。これから、オーステナイト化温度によらず、加工度が 0.3 から 0.4 になると硬度に対する加工度の影響が飽和してくることがわかる。なお、Fig.5 は、オースフォーミングし、焼入れたものの焼戻し温度と硬度との関係を示したものであるが、500°C まではオース

Fig.1 Effect of austenitizing temperature on vickers hardness. (B specimen)

Fig.2 Effect of keeping time at 550°C prior to deformation on vickers hardness. (A specimen)

フォーミングの硬度に対する効果はそのまま残ることが認められる。

Fig. 6 は、550°C と 650°C においてオースフォーミングし焼入れた後の硬度と、オースフォーミングの際の変形抵抗

があるが、ほとんど影響しないと考えてよい。

(3) ひずみ速度 $\sim 10^2/\text{sec}$ の変形速度でオースフォーミ

Fig. 3 Effect of keeping time at 550°C after deformation on vickers hardness. (B specimen)

Fig. 4 Relation between reduction and vickers hardness at various austenitizing temperature. (B specimen)

抗との関係である。Fig. 6 からわかることは、オースフォーミング条件、すなわち、温度、ひずみ速度のいかなを問わず、オースフォーミングし焼入れた後の硬度は、オースフォーミング終了時のオーステナイトの強度と一意的な関係があるということである。

IV. 考 察

本実験による主要な結果はつぎのとおりである。

(1) オースフォーミングを行なう前に、オースフォーミング温度に保持する時間は、焼入れ後の硬度に影響を与えない。

(2) オースフォーミング後、オースフォーミング温度に保持する時間は、焼入れ後の硬度をやや少し低くする傾向

Fig. 5 Variation of vickers hardness with tempering temperature. (B specimen)

Fig. 6 Relation between hardness of ausformed martensite and flow stress of the ausformed austenite at the ausforming temperature. (C specimen)

ングをすると、硬度に対するオースフォーミング加工度の影響は加工度 0.3~0.4 で飽和する傾向がある。

(4) オースフォーミングし焼入れた後の硬度は、オース

フォーミング終了時の材料の強度により決まり、オースフォーミング温度およびそのひずみ速度の影響を受けない。

実験結果の(1)は、オーステナイト化温度から、オースフォーミング温度まで急冷した後、いわゆるS曲線の“bay”で保持している時間のうちに、オースフォーミング後焼入れしたときの機械的性質に影響を与えるような変化が過冷オーステナイトに起こらないことを意味している。したがってオースフォーミングのマルテンサイト硬度への影響は、オースフォーミング温度に保持することによるのではないことがわかる。

(2)は、オースフォーミングを終えてからオースフォーミング温度に保持することは、焼入れ後のマルテンサイトの硬度をやや減少させるということであるが、これは、このオースフォーミング温度における加工されたオーステナイトの回復の影響によるものと思われる。したがって、4340鋼のオースフォーミング温度である550°Cでは、過冷オーステナイトの加工後、再結晶による完全な回復も、また加工によつて過冷オーステナイトに導入された格子欠陥に基づく炭化物の析出が、マルテンサイトの硬度に影響をおよぼすほどは起こらなかったと考えられる。したがって、オースフォーミングによるマルテンサイトの強化はthermalな過程に基づく炭化物の析出によるのではないと考えられる。そこで、オースフォーミングによるマルテンサイトの強化に、もし、炭化物の析出が有効であるならば、その炭化物は、加工中に形成されたものでなければならない。

実験結果(3)は、高ひずみ速度でオースフォーミングをすると、Zackayら⁽³⁾が、圧延によつて80%圧下しなければ得られなかったマルテンサイトの強度上昇を30~40%の加工度で達成できたということである。この事実は、まず、オースフォーミングのマルテンサイト強化が炭化物の析出によるならば、この析出過程は拡散過程を伴うものではないことを意味している。実験結果(1)と(2)は応力付加の状態において、すなわち加工中に炭化物の析出がマルテンサイト強度に影響するように起こる可能性を否定していない。さらにこの実験結果(3)は炭化物の析出の有無を決定するものではないが、高ひずみ速度で変形した方が、小さい加工度でマルテンサイトの強化が可能だということは、炭化物の析出がマルテンサイト強化に有効ならば、その析出過程は、athermalなものでなければならないということがいえる。

しかしながら、この実験結果(3)は、オースフォーミングによるマルテンサイトの強化は、オーステナイトの加工硬化がマルテンサイトに引きつがれるという加工硬化説の立場に立てば無理なく説明が可能である。すなわち、オーステナイトは面心立方晶であるから、加工硬化状態は温度とひずみ速度に依存する⁽⁴⁾。われわれの実験条件はZackay

ら⁽³⁾の条件に比べて、ひずみ速度が 10^3 倍早い。したがって加工硬化が小さいひずみで十分起こることが期待される。

実験結果(1)(2)(3)は、オースフォーミングの強化機構が、炭化物の析出によるのではなく、加工硬化の引きつぎによると考える方が妥当であることを示しているが、実験結果(4)は、加工硬化の引きつぎがマルテンサイト強化の主役であることを決定的に示している。すなわち、マルテンサイトの硬度はオーステナイトを加工したときのflow stressにより一意的に決定されており、加工条件(温度とひずみ速度)によらない。このことは、炭化物の析出がたとえ、athermalに応力の作用によつて起こるとしても、550°Cと650°Cの加工温度で同じだけ析出するとは考えられないし、鋼中の炭化物にこのような性質のものはまだ存在が確認されていないので、炭化物による強化説を否定する事実である。Fig.6からマルテンサイトのビッカース硬度 M_H と、オーステナイトの加工終了時のflow stress $A\sigma$ の間に、

$$M_H = M_H^0 + 3A\sigma \quad (1)$$

の関係が認められる。ここで M_H^0 は $A\sigma=0$ に外挿したときの値であつて、オースフォーミングしない場合の硬度ではない。Fig.6の場合は M_H^0 は515である。マルテンサイトのビッカース硬度がオーステナイトの加工終了時のflow stressの3倍と直線関係にあるということは、興味深い事実である。すなわち、ビッカース硬度はだいたい、降伏強度の3倍といわれているので、このことは、マルテンサイトの降伏強度の増大が、オーステナイトの加工硬化に基づくflow stressの増大と全く等しいことを意味している。

M_H^0 は、材料の熱履歴や加工履歴、化学成分によつて決定される量である。すなわち、本実験に使用した4340鋼の3種の試料においてすべて焼入れマルテンサイトの硬度レベルが異なるのはこの M_H^0 が異なるためである。Fig.6は、C-試料について求めた $M_H-A\sigma$ 関係である。つまり、オースフォーミングされたマルテンサイトの強度は、オースフォーミングしない場合のマルテンサイトの強度にオーステナイトが加工硬化して得た強度上昇が、そのまま増加分として加わつたものである。

さて、オースフォーミングによるマルテンサイトの強化機構としてマルテンサイト微細化説がある。これは、オースフォーミングによつて生じたオーステナイト相の変形帯によつて、マルテンサイトの成長が阻止されることによるといわれている。Zackayら⁽³⁾は、オースフォーミングしたマルテンサイトの降伏強度(σ)とマルテンサイト板の長さ(d)との間に

$$\sigma = \sigma_0 + kd^{-1/2} \quad (2)$$

が成立することを見出した。しかしながら(2)式における k の値は $6.3 \text{ kg/mm}^{3/2}$ であつて、この値は鉄の降伏点の場合に比べて非常に大である。通常 k は鉄の降伏点の場合 $2\sim 3 \text{ kg/mm}^{3/2}$ であり、著者らの二人の研究⁽⁵⁾によ

(3) J.C.Shyne, V.F.Zackay and D.J.Schmatz: Trans. Amer.Soc.Met., **52** (1960), 346.

(4) たとえば五弓, 木原: 塑性と加工, **6** (1965), 403.

(5) 五弓, 木原: 強度国際会議に講演, Preprint P.228.

ると $2.6 \text{ kg/mm}^{3/2}$ がリューダース帯伝播を伴なう場合の値で、リューダース帯伝播を伴わない降伏の場合 (圧縮試験の場合) $1.1 \text{ kg/mm}^{3/2}$ であることが確かめられている。さらに、マルテンサイトの板状結晶の長さが同じ場合でも、オースフォーミングの有無によつて強度が異なることが認められており⁽⁶⁾、したがつて、オースフォーミングによるマルテンサイトの微細化による強度上昇は2次的なものであるといえる。つまり微細化による強度上昇そのものは鉄の例に見るごとく、あまり大きいとは期待できないのであつて、マルテンサイトは微細化する一方、その内部が強化されているのである。

Schmatz ら⁽⁴⁾は、マルテンサイトのオースフォーミングによる強化は、オーステナイトの加工硬化を受けつぐことによるとしながら、なおオーステナイトの加工硬化に対し、微細炭化物が析出することが影響している可能性を考

えているが、われわれの研究結果によれば、そのような微細炭化物の析出がオーステナイト化温度から、 650°C に急冷する間に起こつていなければならないことになる。このようなことは現在のところ考えることができない。

V. 結 論

以上の実験結果に対する考察から、オースフォーミングのマルテンサイト強化は、オーステナイトの加工硬化を受けつぐことによるのであつて、オースフォーミングによるマルテンサイトの微細化は2次的効果を有するだけであり、さらに炭化物の役割は考えることができないことが明らかになつた。

終りに本研究を遂行するにあたり、当時東海大学学生であつた山下伸也氏、藤野靖郎氏の助力に感謝の意を表する。

(6) W.M. Justusson and D. J. Schmatz : ASM Trans. Quart, **55** (1962), 640.