

Table 5. Economic comparison in austenite-grain refining.

Austenite-grain refiner	Price (yen/t)	Element added (%)	Cost for austenite-grain refining. yen/t steel product	Economy*
Ferro-vanadium (50% V, 50% Fe)	1,300,000	V: 0.10	2,600	—
Ferroniobium (75% Nb, 25% Fe)	1,950,000	Nb: 0.03	780	-70.0%
		Nb: 0.04	1,040	-60.0%

* Economy was evaluated on the basis of vanadium of 0.10% using ferro-vanadium.

1. Nb を添加することにより鋼の鑄造組織ならびにオーステナイト組織はいちじるしく微細化する。オーステナイト結晶粒の微細化調整に必要なして十分な Nb の最少量は 0.03~0.04% である。

2. Nb を添加することにより、オーステナイト結晶粒の粗大化温度は上昇し、たとえば Nb 量が 0.03~0.04% の場合、粗大化温度は約 160°C 上昇して約 1,050°C になる。

3. Nb の脱酸力は比較的に小さく、本実験鋼種ならびに Si を含有する溶鋼中においては事実上脱酸効果は認められない。しかしながら Mn よりは脱酸力がかかなり大きいので、凝固過程に温度の低下とともに過飽和に達する O と結合し、酸化ニオブ系の非金属介在物を析出すると考えられるが、このような酸化物は非常に微細であり、量的にも少なく JIS 法による鋼材の清浄度 ($d_{60 \times 400}$) の値には大きな影響をおよぼさない。また Nb は C ならびに N に対する親和力が大きく、容易にこれら

元素と化合して炭化物、窒化物を生成する。これらの非金属介在物は比較的に微細であり、酸化物同様に鋼材の清浄度にはほとんど影響をおよぼさない。

4. オーステナイト結晶粒の微細化現象は Nb の炭化物、窒化物などの存在によるものであり、また粗大化温度の上昇はこれらの化合物が結晶粒の成長を抑制する結果である。鑄造組織の微細化現象は溶鋼または凝固過程に析出した酸化物の存在によるものであると考えられる。

5. Nb を添加することにより鋼材の降伏点ならびに衝撃値が向上し、降伏比が大きくなる特長がある。

文 献

- 1) 成田貴一: 鉄と鋼, 41 (1955), p. 965
- 2) E. E. FLETCHER, A. R. ELSEA: Iron Age, (1960) 2, p. 72
- 3) F. WESTON STARATT: J. of Metals, (1958) 12, p. 799

低クローム・モリブデン鑄鋼の焼き入れ焼き戻しについて*

(低合金鋼の熱処理による室温内部摩擦の変化—I)

美馬源次郎**・山根 寿巳***

On the Quenching and Tempering of a Low Cr-Mo Cast Steel.

(Changes in internal friction at room temperature of a low Cr-Mo alloy steel by heat treatments—I)

Genjiro MIMA and Toshimi YAMANE

Synopsis:

Changes in internal friction at room temperature of a low Cr-Mo alloy steel which has

* 昭和38年4月本会講演大会にて発表 昭和38年5月27日受付

** 大阪学大工学部, 工博 *** 日立造船株式会社技術研究所, 工博, 大阪大学工学部講師.

excellent resistance to tempering and low tendency to tempering brittleness were investigated together with changes in mechanical properties and micro-structures.

Internal friction was measured in terms of free decay of transversal resonance vibration which was caused in a specimen by the electro magnetic method.

Experimental results are as follows:

(1) Excellent toughness and smallest value of strain amplitude independent internal friction are observed with specimen tempered at about 700°C after quenching. This is probably due to uniform distribution of fine carbides and pinning-down effects of dislocations.

(2) A martensite structure has not strain amplitude dependent internal friction.

(Received 27 May 1962)

I. 緒 言

クローム・モリブデン鋼は焼きが入りやすく、焼き戻しに対する抵抗性が大きく、質量効果も小さく、その上ニッケル・クローム鋼に比較して焼き戻し脆性を示す傾向が少ない²⁾などの熱処理特性を持ち、構造用強靱鋼として広く使用されている。クローム・モリブデン鋼も他の鋼種と同様に鍛錬材としても多く利用されるが低合金鋼としての用途も広い。また鋼では鋼放しのままでは機械的性質があまり良くないため熱処理をほどこし所要の機械的性質を与えて実用に供している。この焼き入れ焼き戻しなどの熱処理によつてえられる機械的性質は焼き戻し温度と加熱時間により異なつた値を示す。これはマルテンサイト中に炭素その他の合金元素を強制固溶させた状態より焼き戻しにより炭化物を析出し、またマトリックスが正方晶より立方晶へと変つていくためである。析出炭化物は焼き戻し温度が高まると低炭化物から高炭化物³⁾さらに凝集しその大きさをますことは明らかであるが焼き入れした鋼、特に本鋼の焼き戻しに伴う現象は複雑で不詳のことも多い。本研究はクローム・モリブデン鋼の焼き戻しおよび恒温変態処理をした場合の内部摩擦と機械的性質および組織の関係について調べた結果についての報告である。

II. 試 料

3t エル式塩基性アーク溶解炉で溶解した湯から乾燥砂型にて厚さ約 10cm、巾約 30cm、長さ約 1m の寸法の鋼をつくつた。実験に使用する試料はすべて鋼の巾方向に切り出した。試料の化学組成は Table 1 に示すごときのものである。

Table 1. Chemical composition of sample in weight %

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
0.23	0.30	0.54	0.025	0.011	1.13	0.24

また上記のように切り出した各試料はオーステナイト領域である 900°C より油焼き入れをし焼き戻しをした。焼き戻し時間はいずれの焼き戻し処理においても 30 min間に一定した。恒温変態処理の場合は 900°C に加熱保持した試料を各恒温変態温度に保持した塩浴に 900°C より焼き入れ変態完了まで (3 hr) その温度に保持後取り出し空冷した。

III. 実験方法

1. 機械試験

引張り試験に使用した試験片は JIS 4号引張り試験片で、シャルピー衝撃試験には JIS 4号Vノッチシャルピー衝撃試験片を使用した。

2. 内部摩擦測定

すでに発表されている⁴⁾電磁気的方法で試験片に強制共鳴横振動を与え、駆動力を切り、この共鳴振動を減衰させ歪振巾が最初の歪振巾の $1/n$ になるまでの時間 t_n を測定し、次式により内部摩擦を計算した。

$$Q^{-1} = l_n n / (\pi f_0 t_n)$$

ただし f_0 は共鳴振動周波数で本実験では $n=4$ を使用した。

内部摩擦測定試験片は 5mm×10mm×200mm の角棒に加工したものを使い試験片は 900°C より油焼き入れをし内部摩擦を測定したあと同一試験片を 200°C に焼き戻し空冷をし再び内部摩擦を測定し、このように漸次焼き戻し温度を高めながら焼き戻しと内部摩擦の測定を交互に進めた。

恒温変態処理の場合も同じように試験片を 900°C から低温の恒温変態温度の塩浴に焼き入れ恒温変態を 3hr させて空冷後内部摩擦を測定し、次に 900°C に加熱し次により高い恒温変態温度で変態をさせて空冷後内部摩擦を測定というように同一試験片に何回も恒温変態処理を与えて内部摩擦を測定した。

IV. 実験結果

1. 焼き入れ焼き戻しの場合

a. 機械試験結果

900°C から油焼き入れした後、各焼き戻し温度で 30 min 加熱の後に空冷した試料の室温における機械的性質を Fig. 1 に示す。図から明らかなように引張強さは 500°C 以上の焼き戻し温度で低下をする。これに対してシャルピー衝撃値は 700°C の焼き戻しで著しく良好な靱性を示す。これは後述する顕微鏡組織から理解されるようにフェライト中の炭化物の存在と分布状態およびフェライト中の転位のピン止め効果に依存するものと考えられる。次に油焼き入れした試料を各温度で 30min 焼き戻した場合の室温における硬度と油焼き入れした試料を 3°C/min の速度で加熱しながら測定した高温における硬度を Fig. 2 に示す。焼き戻した場合の室温硬度は引張り強さの低下しはじめる約 500°C よりやや高い温度で

低下をはじめている。

次に 900°C から油焼き入れ後、焼き入れのまま、500, 600, 700 および 800°C で各 30min 焼き戻した試料の低温におけるシャルピー衝撃試験結果を Fig. 3 に示す。これらの試験結果から 700°C で 30min 焼き戻した試料の室温における靱性は最も良好であるが、今、シャルピー衝撃値の最大値の 1/2 のシャルピー衝撃値を示す温度および剪断破面率が 50% を示す試験温度をそれぞれ遷移温度と定義して焼き戻し温度と遷移温度との関係を求めると Fig. 4 のようになる。遷移温度は 700°C における焼き戻しにより最も低くなっており、鋼の靱性が良いことを示している。この理由は後述するマルテンサイトの分解後の炭化物の挙動およびフェライト中の転位のピン止め効果に主として起因するものと考えられる。

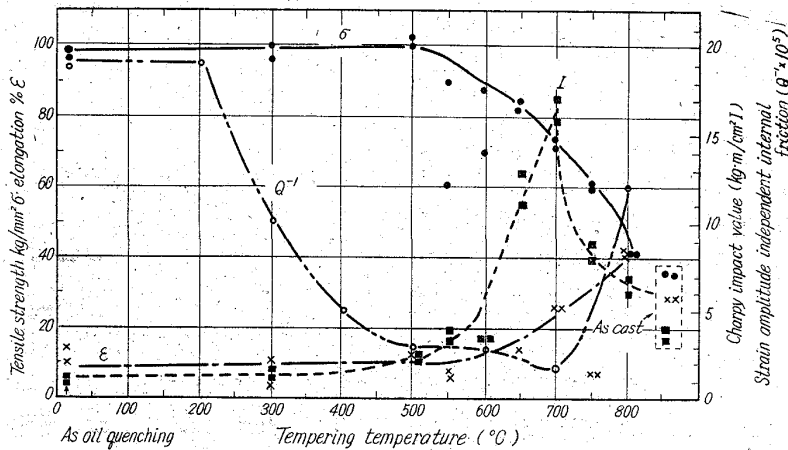


Fig. 1. Changes in various properties of specimens tempered for 30 minutes after quenching in an oil from 900°C.

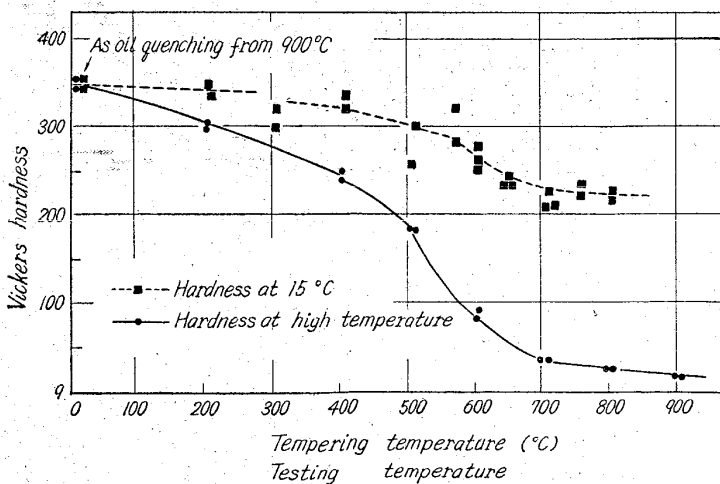


Fig. 2. Hardness at high temperatures of specimens quenched in an oil from 900°C, and hardness at 15°C of specimens tempered for 30 minutes after quenching in an oil.

b. 内部摩擦測定結果

油焼き入れ後低温から同一試験片を各 30min ずつ焼き戻した場合の内部摩擦の歪振巾依存性を Fig. 5 に示す。焼き入れのまま 200°C の焼き戻しでは内部摩擦に歪振巾依存性は全くなかったが焼き戻し温度が高くなるにつれて歪振巾依存性は次第に大きくあらわれてきた。低歪振巾における歪振巾に非依存性の内部摩擦と焼き戻し温度の関係は Fig. 1 に示したとおりで 200~500°C の焼き戻しで低下の一途をたどり 700°C で最小値を示し 800°C の焼き戻しにより著しく増大する。後述するように 200~500°C の歪振巾に非依存性の内部摩擦の減少はマルテンサイトの分解の諸現象に対応するものであり 700°C における最低値は炭化物の分布とその存在状態によるものであり、800°C の焼き戻しで著しく増大するのはオーステナイトになった組織がフェライトとパーライトに分解するが分解後の状態がマルテンサイトが分解してフェライトと炭化物になった状態と異なるためである。

c. 顕微鏡組織

Photo. 1 は油焼き入れ後 590~800°C まで焼き戻し空冷後の顕微鏡組織である。(b) の 590°C に焼き戻した組織はベーナイト状の組織であるが 700°C に焼き戻した組織は極めて細かい炭化物粒がフェライト地に分散しており 750°C に焼き戻したものにおいては炭化物粒が凝

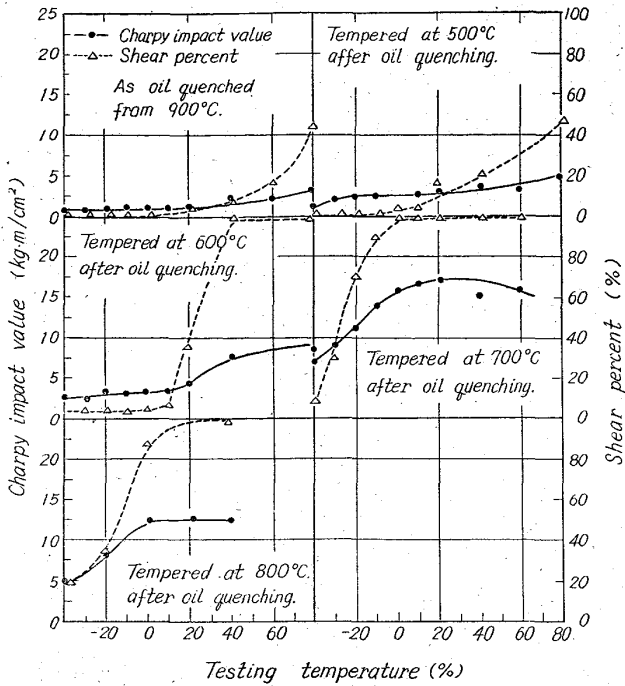


Fig. 3. V-notch Charpy impact test results of specimens quenched in an oil or tempered after oil quenching from 900°C.

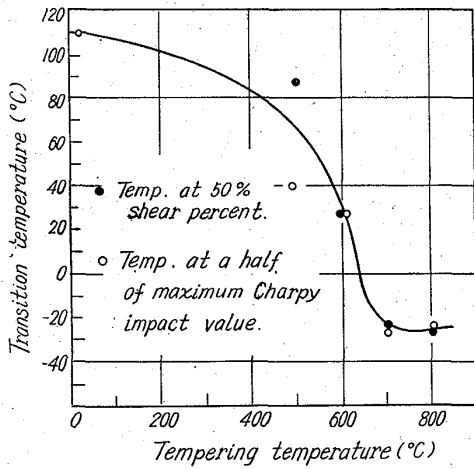


Fig. 4. Relation between transition temperature and tempering temperature.

集粗大化しているのが認められる。さらに 800°C に焼き戻すとフェライトとパーライトからなる標準組織になっている。

Photo. 2 は油焼き入れした試料を室温から 3°C/min の加熱速度で高温に加熱した場合の試料の同一個所の高温における組織を示す。室温ではマルテンサイトであるが 200~300°C の加熱で結晶粒界が生成する傾向が現われ、400~600°C あたりまで粒界は次第に明瞭になってくる。高温組織は約 700°C で一旦見えなくなり 750°C でぼやけた組織が見えだす。これは一部オーステナイト

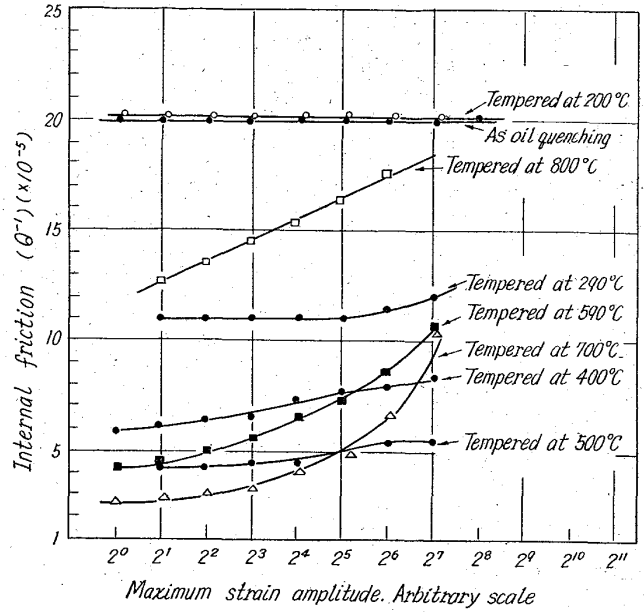
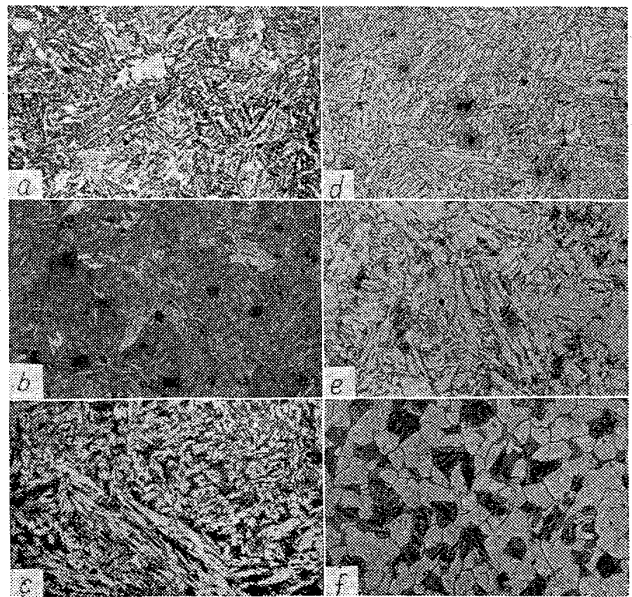


Fig. 5. Strain amplitude dependence on internal friction of the specimen tempered for 30 minutes after quenching in an oil from 900°C, then cooled in air. f_0 ; about 650 c.p.s.



(a) As casting (d) Tempered at 700°C
 (b) Tempered at 590°C (e) " at 759°C
 (c) " at 630°C (f) " at 800°C

Photo. 1. Microstructures of specimens tempered for 30min after oil quenching from 900°C. $\times 400$ (1/2)

に変態するためであろうが 800°C で白地のオーステナイト組織が見られるようになり、900°C では結晶粒界が明瞭な完全オーステナイトが見られている。

2. 恒温変態処理の場合

400~650°C で恒温変態を 900°C から各恒温変態温度に保持した塩浴に焼き入れて行ない、変態完了後空冷し

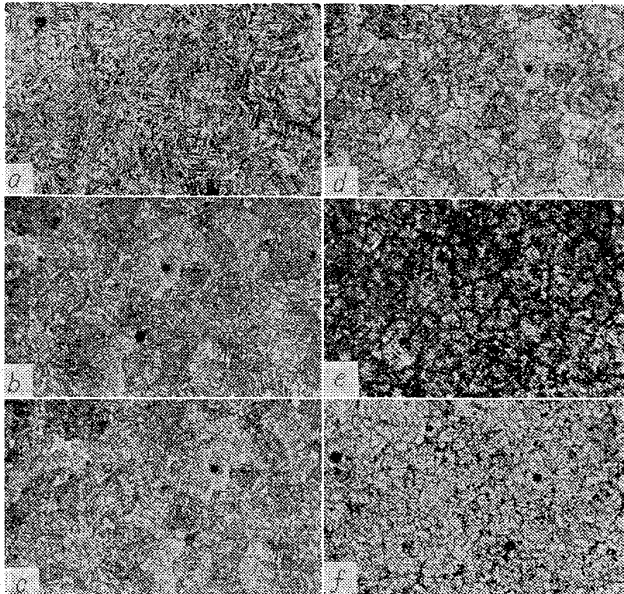


Photo. 2. High temperature microstructures of a specimen quenched in oil from 900°C. $\times 150$ (1/2)

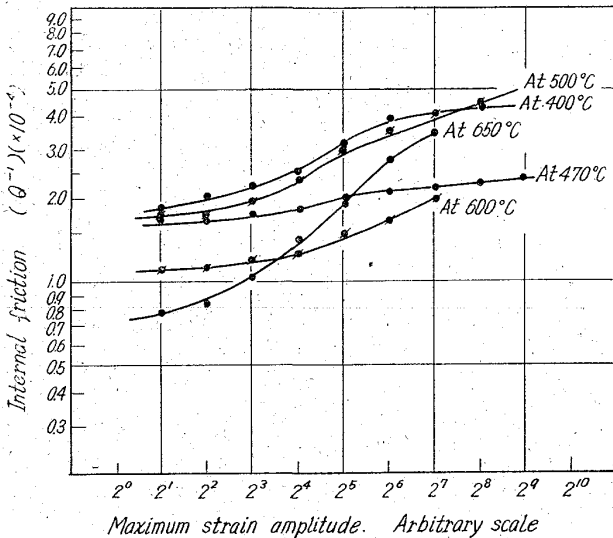


Fig. 6. Strain amplitude dependence on internal friction of the specimen transformed isothermally. f_0 : about 650 c.p.s.

た同一試験片の歪振巾依存性は Fig. 6 に示すとおりである。いずれの恒温変態温度で変態させても歪振巾依存性を有しており、恒温変態温度が高くなると歪振巾依存性の傾向は大きくなっている。恒温変態温度と歪振巾に非依存性の低歪振巾における内部摩擦およびピッカース硬度の関係は Fig. 7 に示すとおりである。硬度と内部摩擦は 500~650°C の恒温変態温度で低下を示し軟くなっている。この状態を組織からみると Photo. 3 に示す

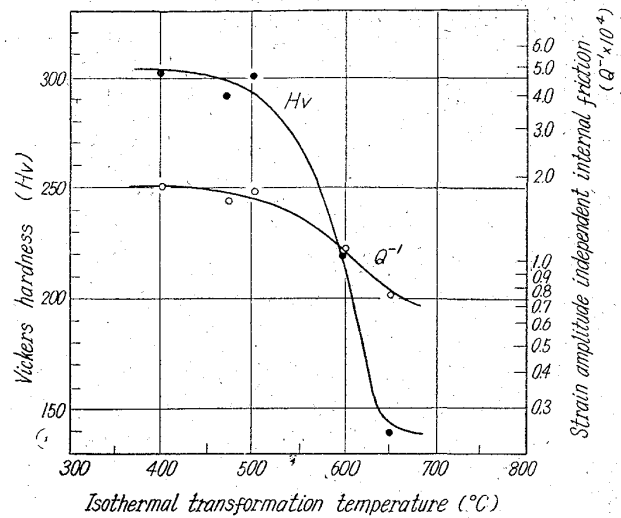


Fig. 7. Changes in hardness and strain amplitude independent internal friction of the specimen transformed isothermally

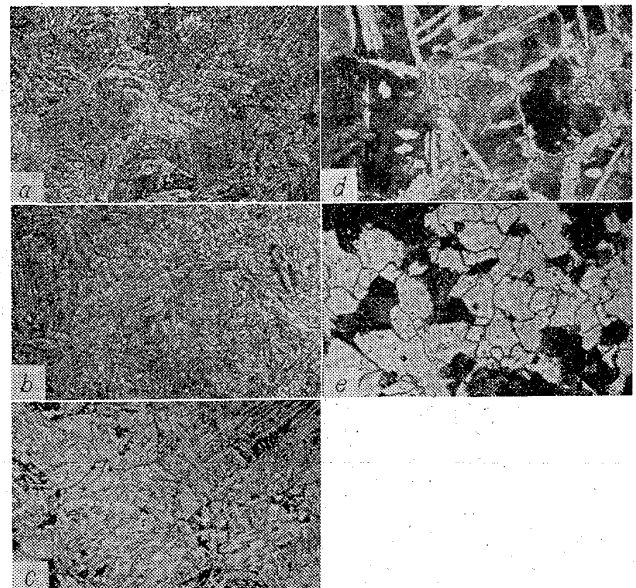


Photo. 3. Microstructures of specimens transformed isothermally. $\times 400$ (1/2)

通りで、400°C ではパーナイト組織で恒温変態温度が高くなるにつれて炭化物が粒状化からパーライト化しているのが観察される。

V. 考 察

歪振巾依存性を有する内部摩擦は GRANATO, LÜCKE⁵⁾ による理論で不純物原子によつてピン止めされている転位の弦の歪振巾が大きくなると不純物から引きはなされ、転位弦が長くなりこのためのヒステリシス損失の増大が歪振巾依存性の内部摩擦になると考えている。歪振巾に依存

する内部摩擦 ΔH は

$$\Delta H = \frac{\Omega \wedge L_N^3}{\pi^2 L_C} \cdot \frac{K\eta a}{L_C \epsilon_0} \exp\left(\frac{-K\eta a}{L_C \epsilon_0}\right) \dots (1)$$

ここで Ω は方向係数で K はピン止めをはずすに要する応力(方向係数を含む), η は Cottrell の原子直径の差を示すパラメーター, a は原子間距離, L_C は不純物間の平均距離をまた ϵ_0 は最大振巾, L_N は応力が大きくなり不純物から引き離された転位のループの長さを表わす。

マルテンサイト組織に振巾歪依存性の内部摩擦がないということは(1)式において不純物間の距離 L_C が大きいことに起因すると考えられ炭化物として炭素が存在しないためである。これに対して焼き戻すと炭素が炭化物となり(1)式の L_C が小さくなりそのため ΔH が大きくなるものと考えられる。Fig. 1 に示した低振巾歪における内部摩擦の焼き戻しによる変化は次のように説明できる。約 600°C までの焼き戻しではマルテンサイトから炭化物が析出しマルテンサイトが分解するために内部摩擦は急激に減少し、さらに 700°C で最小値を示すのは析出炭化物の一部がフェライト中に再固溶しこれが冷却に際してより細い炭化物が析出し、約 600°C の場合よりもさらに転位のピンダウンを効果的にしたためと考えられる。また 700°C 以上たとえば 800°C で内部摩擦が急増したのは、析出炭化物が A_3 変態をなし再びオーステナイトに固溶し冷却にさいしてフェライトとパーライトに分解し、自由フェライト中の自由な転位が生成したためと考えられる。

恒温変態させた試料の組織は変態温度が低い場合には細いペーナナイト状組織であるが変態温度が高くなるに従って組織が粗大化しフェライトとパーライト組織に分かれてくる。従って硬度は変態温度が高い程低く、変態温度が低くなるに従って高い値を示している。歪振巾非依存性の内部摩擦の変化はこの硬度の変化と同じ傾向に

ある。マトリックス内の内部摩擦的な硬さというものは結晶粒界、結晶粒内の格子欠陥、不純物原子の分布、内部歪などの諸因子に影響されるが、これらの総合された動的なヒステリシスはこの場合は硬度の変化と同じ傾向にあるという結果になつている。

恒温変態させた試料に歪振巾依存性の内部摩擦が見られ、しかも変態温度が低いと歪振巾依存性は小さく、変態温度が高い程、歪振巾依存性は大きい傾向があるのはマトリックス内の不純物原子の分布とそれからの転位のはずれやすさに関係しているのであろう。

VI. 総 括

以上の諸実験結果および考察をまとめると次のようになる。

(1) 焼き入れ焼き戻しの熱処理をした場合約 700°C の焼き戻しで著しい靱性の増大と、振巾歪に非依存性の内部摩擦の最小値を示すことがわかつた。これはフェライト中に分布する炭化物の均一微細化とフェライト中の転位のピン止めの効果が作用するためと考えられる。

(2) マルテンサイト組織は振巾歪に依存する内部摩擦を有していない。

(3) 恒温変態をした場合はいずれの変態温度においても振巾歪依存性の内部摩擦があり、変態温度が高くなると振巾歪に非依存性の内部摩擦は小さくなり、硬度の変化の傾向との一致を示している。

文 献

- 1) 俵: 鉄と鋼, 23 (1937) p. 875
- 2) W. S. PELLINI, B. R. QUENEAU: Trans. Amer. Soc. Metals., 39 (1947), p. 139~161
- 3) G. KURDJUMOV et: J. Iron & Steel Inst. (U.K.), 156 (1947), p. 29
- 4) T. YAMANE, J. UEDA: Trans. J.I.M., 3 (1962), p. 178
- 5) A. GRANATO, K. LÜCKE: J. App. Phys., 27 (1956), p. 583, 27 (1956), p. 789