

技術報告

ばね鋼の強靱化におよぼす誘導加熱焼もどしの効果

川 寄 一 博*・千 葉 貴 世*・山 崎 隆 雄*2

Effect of Induction Heating Tempering for Strengthening and Toughening of Spring Steel

Kazuhiro KAWASAKI, Takayo CHIBA and Takao YAMAZAKI

Synopsis :

It was shown in the previous paper that grain refining by Induction Heating austenitizing and Quenching (IHQ) is effective for the improvement of mechanical properties of Si-Cr spring steel (SUP12). However, it was also shown that Induction Heating Tempering (IHT) as well as grain refining by IHQ plays an important role for superior mechanical properties of Induction Heating Quenched and Induction Heating Tempered (IHQIHT) material.

So, in this report the independent effect of IHT on strengthening and toughening of SUP12 is investigated.

(1) IHT is effective for the improvement of ductility, toughness, fracture toughness, resistivity to delayed fracture, and fatigue life apart from the effect of grain refining by IHQ. In case of SUP 6, SUP 7, SWRH62B and S45C, IHT materials show toughness generally superior to that by the ordinary tempering.

(2) Shorter time and higher temperature heating as well as rapid heating in IHT are effective for strengthening and toughening.

Key words : induction heating ; furnace heating ; spring steel ; temper ; strength ; toughness.

1. 緒 言

前々報¹⁾では、誘導加熱 (IH) 焼入れ焼もどし (II : IHQIHT) 材が一般的な炉加熱 (FH) 焼入れ焼もどし (FF : FHQFHT) 材に比べてより優れた強靱性を示すことを明らかにした。また、前報²⁾では、急速、短時間加熱を特徴とする IH オーステナイト (γ) 化焼入れ (IHQ) による旧 γ 結晶粒 (結晶粒と略す) 径 $d=10\mu\text{m}$ 程度までの結晶粒微細化が強靱化に有効なことを明らかにし、同時に、II 材の優れた機械的性質には、IHQ と同様に、IH 焼もどし (IHT) も重要な影響をおよぼすと考えられることを示した。

本研究では、この IHT の強靱化効果を明らかにするために、ばね用 Si-Cr 鋼 (SUP 12) を供試鋼として、同じ焼入れ材を IHT または FH 焼もどし (FHT) した場合の延性、靱性、破壊靱性、遅れ破壊靱性、経時変形 (へたり) 特性、疲れ特性を検討した。また、硬さと靱性におよぼす焼もどしの加熱速度、加熱温度および加熱

時間の影響も検討した。

機械的性質におよぼす IHT の影響についてはいくつかの研究がなされているが^{3)~9)}、IHT を積極的な強靱化手段と位置付けた研究は見あたらない。

2. 実験方法

2.1 供試材および熱処理

供試鋼には前々報¹⁾と同じ2種類の SUP 12 [A 鋼/B 鋼, C : 0.58/0.55, Si : 1.38/1.44, Cr : 0.63/0.67 (wt%)] を用い、Fig. 1 に示すように焼入れと焼もどし

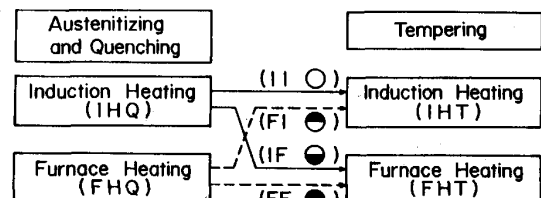


Fig. 1. Combination of quenching and tempering process.

昭和 60 年 10 月本会講演大会にて発表 昭和 61 年 8 月 1 日受付 (Received Aug. 1, 1986)

* 高周波熱錬(株)技術部 (Technical Dept., Neturen Co., Ltd., 5893 Tamura Hiratsuka 254)

*2 高周波熱錬(株)特線部 (Spring Wire Dept., Neturen Co., Ltd.)

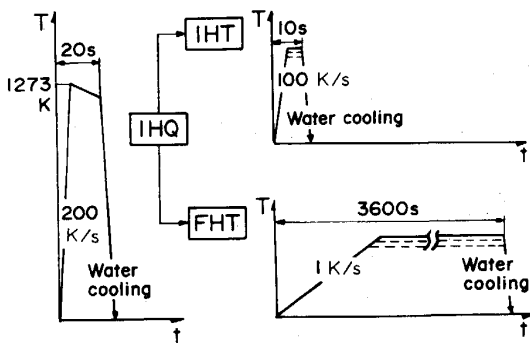


Fig. 2. Schematic figure of heat-treating cycle (from IHQ material).

を組み合わせ供試材を作製した。B鋼は破壊靱性試験片と回転曲げ疲れ試験片の作製に用い、その他の試験片の作製にはA鋼を用いた。Fig. 2は、IHQ材を用いた場合の熱サイクルを示したもので、IHQ材は、連続IH熱処理装置を用いて、加熱温度1273 Kまで加熱速度200 K/sで急速加熱し、総加熱時間が20 sになるまで放冷して γ 化した後水焼入れして作製し、平均結晶粒径 $d=12\ \mu\text{m}$ (粒度: No. 10)を得た。続いて、IHTは、定置式の実験用IH装置を用いて、種々の硬さが得られる各加熱温度(焼もどし温度)まで100 K/sで急速加熱し、総加熱時間が10 sになるまで保持した後水冷して行つた。FHTは、電気炉を用いて、各焼もどし温度まで約1 K/sで加熱し、総加熱時間が3600 sになるまで保持した後水冷して行つた。また、FHQ材は、電気炉を用いて、1173 Kまで約1 K/sで加熱し、総加熱時間が1800 sになるまで保持して γ 化した後水焼入れして作製し、 $d=22\ \mu\text{m}$ (No. 8)を得た。焼もどし方法と条件は、IHQ材の場合と同一である。なお、焼もどし温度と硬さとの関係はFig. 3に示す。

2.2 試験方法

本実験では、結晶粒径測定、ロックウェル硬さ測定、破面観察、引張り試験、高温(373 K)と常温(293 K)および低温(77 K~273 K: JIS Z 2242に準拠)でのシャルピー衝撃試験、常温での破壊靱性試験、水素脆性環境での引張りおよびねじり遅れ破壊試験、常温でのねじりクリープ試験と室温でのねじりリラクセーション試験、それに回転曲げ疲れ試験を行つた。これらの試験方法は前々報¹⁾で述べたとおりである。

3. 実験結果と考察

3.1 焼もどし温度および時間と硬さとの関係

焼もどし温度と硬さとの関係を求めた結果、Fig. 3

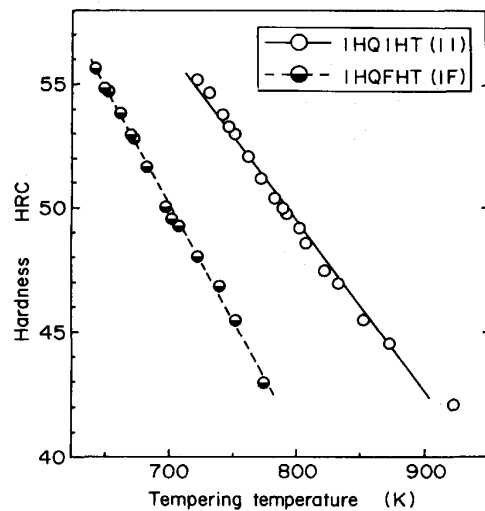


Fig. 3. Relation between tempering temperature and hardness.

に示すように、II材、IF材両材とも、 $\text{HRC}=45\sim 55$ の範囲ではほぼ直線関係を示し、同じ硬さが得られる焼もどし温度は、加熱時間が短いII材の方が約100 K高い値を示した。また、これらの関係をもとに、焼もどしパラメーター式 $P=T[\log(t)+C]$ [$T(\text{K})$: 温度, $t(\text{s})$: 時間]の定数 C の値を計算した結果 $C=20$ が得られた。また、 P と硬さとの関係は、ほぼ1本の焼もどし母曲線で整理できた。前々報¹⁾と同様に、同じ硬さが得られるIHTとFHTの焼もどし温度と時間の組合せの間には互換性があることが確かめられた。ところで、一般には、硬さだけでなく延性や靱性などの機械的性質も焼もどしパラメーターを用いて整理できるとされている¹⁰⁾。そこで、このことを確かめるために、各機械的性質を示す以下の図の横軸には、硬さとともに焼もどしパラメーターの値も付記する。なお、 C の値が前々報¹⁾での値(17.7)と異なるのは、同じIHTでも、加熱速度(前々報: 約200 K/s, 本報: 100 K/s)および所定の焼もどし温度に達してから水冷までの間の処理(前々報: 12 s放冷, 本報: 約5 s保持)が異なることが影響したものと考えられる。ここでの焼もどし時間には、昇温中の焼もどし過程の進行¹¹⁾を考慮して、便宜的に(昇温時間/2+放冷または保持時間)の値を用いた。

3.2 各機械的性質の比較

3.2.1 引張り性質

Fig. 4に示すように、引張り強さは、両材とも硬さに比例して高くなり、同じ硬さの場合には同程度の値を示した。0.2%耐力比は、両材とも硬さが高くなつてもあまり変化せず、かつ同程度の値を示した。0.01%耐力比は、硬さが高くなつてもあまり変化しない傾向は両

材とも同様であるが、全般に、IF材の方が少し高い値を示した。絞りひは、HRC=50付近で最大値を示す傾向は両材とも同様であるが、全般に、II材がより大きな値を示した。破断伸びと一様伸びは、硬さが高くなると徐々に低下する傾向は両材とも同様であるが、II材が

少し大きな値を示した。

3.2.2 衝撃特性

Fig. 5 に示すように、衝撃値は、硬さが高くなると徐々に低下する傾向は両材とも同様であるが、全般に、II材の方がより高い値を示した。Photo. 1 は、衝撃破面の二次電子線(SE)像を示したもので、IF材では、すでに HRC=50 級でも粒界破壊がみられるのに対して、II材では HRC=55 級の高硬さでも、ディンプル破面を主体とした延性破壊を示し、脆化傾向に差がみられた。また、Fig. 6 に示すように、HRC=50 級の供試材

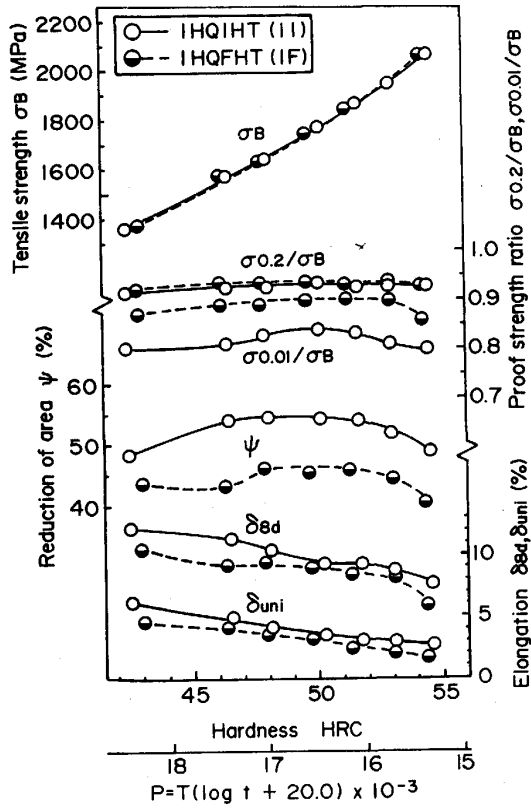


Fig. 4. Tensile properties of IHQIHT and IHQFHT materials.

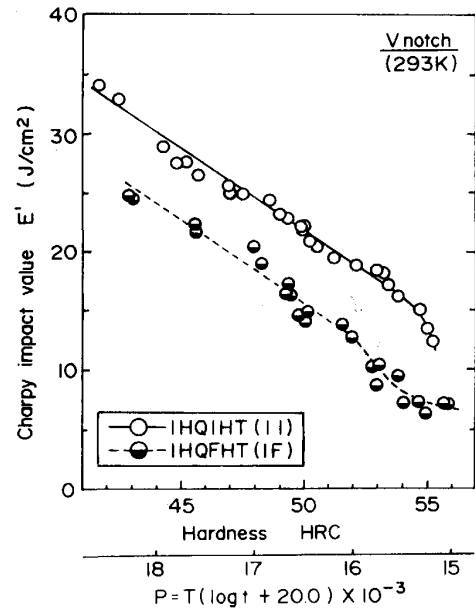


Fig. 5. Impact value of IHQIHT and IHQFHT materials.

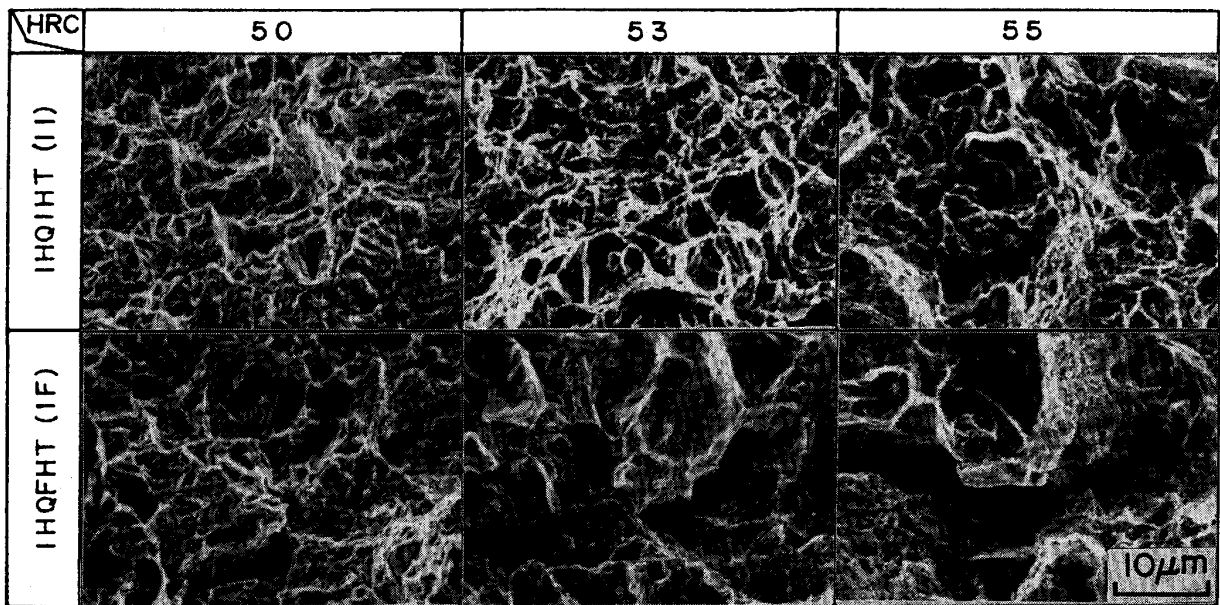


Photo. 1. SEM fractographs of impact tested IHQIHT and IHQFHT specimens.

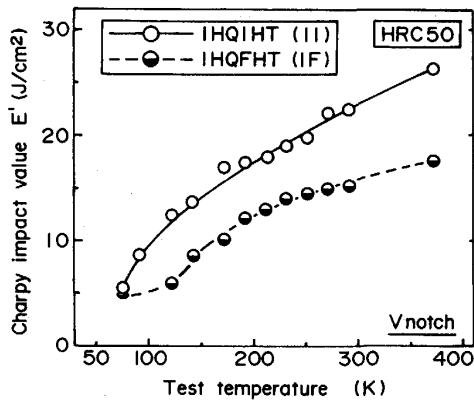


Fig. 6. Influence of test temperature on impact value of IHQIHT and IHQFHT materials.

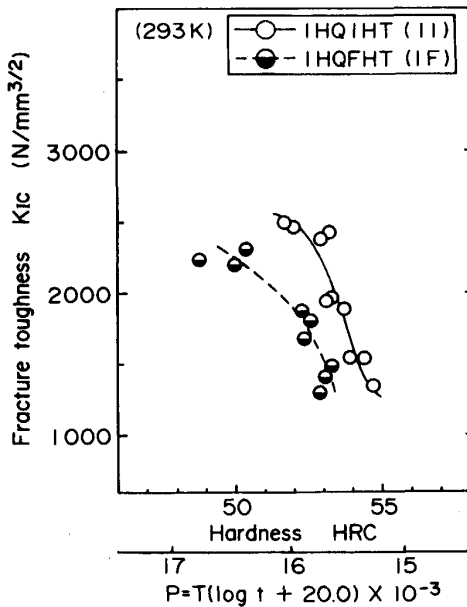


Fig. 7. Fracture toughness K_{IC} of IHQIHT and IHQFHT materials.

では、試験温度が 373 K の場合も室温以下の場合も、II 材がより高い衝撃値を示した。

3・2・3 常温での破壊靱性

Fig. 7 に示すように、 K_{IC} は、硬さが高くなると低下する傾向は両材とも同様であるが、全般に、II 材の方がより高い値を示した。

3・2・4 水素脆性環境での遅れ破壊特性

Fig. 8(A) は、引張り遅れ破壊試験結果を示したもので、破断時間は、硬さが高くなると短くなる傾向は両材とも同様であるが、全般に、II 材の方がより長くなった。そして、HRC=50 級から 53 級へ高硬さ化した場合、破断時間は、IF 材でより急激に短くなる傾向を示した。Fig. 8(B) は、ねじり遅れ破壊試験結果を示したもので、引張り遅れ破壊試験結果と同様の傾向を示した。なお、

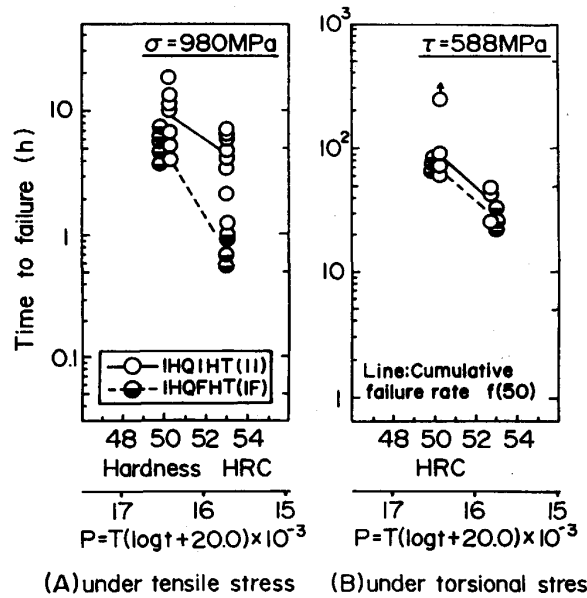


Fig. 8. Delayed fracture test results under (A) tensile and (B) torsional stress of IHQIHT and IHQFHT materials (dipped in 323 K, 20% NH_4SCN).

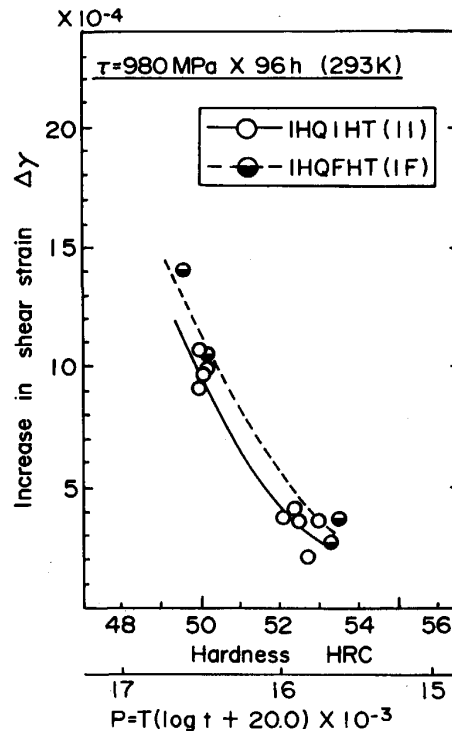


Fig. 9. Creep test result at 293 K under torsional stress of IHQIHT and IHQFHT materials.

いずれの試験片の場合も、両材とも破断起点付近の破面には粒界破壊がみられた。

3・2・5 常温でのへたり特性

Fig. 9 は、ねじりクリープ試験結果を示したもので、

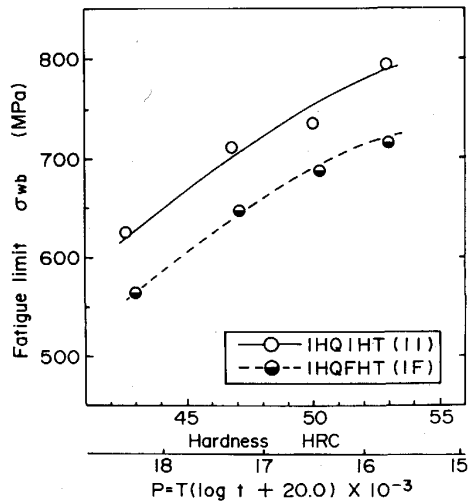


Fig. 10. Fatigue limit σ_{wb} of IHQIHT and IHQFHT materials.

せん断ひずみの増加分 $\Delta\gamma$ は、両材とも硬さが高くなると大きく減少し、HRC=53級の $\Delta\gamma$ は50級の1/2~1/3程度になり、同程度の硬さの場合、その値はII材の方が若干小さいもののさほど差はみられなかつた。また、ねじりリラクセーション試験を行つた結果、硬さとトルクの減少率 $\Delta T/T$ との関係は、ねじりクリープ試験結果と同様の傾向を示した。

3.2.6 回転曲げ疲れ特性

Fig. 10 に示すように、疲れ限 σ_{wb} は、硬さが高くなると上昇する傾向は両材とも同様であるが、全般に、II材の方がより高い値を示した。

3.3 IHTの強靱化効果と焼入れ方法

IHTの強靱化効果と焼入れ方法との関係を明らかにするために、FHQ材を共通の焼入れ材としたFHQIHT(FI)材とFHQFHT(FF)材を供試材として、まず、焼もどし温度と硬さとの関係を求めた。その結果、FI材もFF材もほぼ直線関係を示し、同じ硬さが得られる焼もどし温度はFI材の方が約100K高くなり、IHQ材の場合と同様の傾向を示した。また、これらの関係をもとに、焼もどしパラメーター式の定数Cを求めた結果C=20が得られ、この値を用いて計算した焼もどしパラメーターPと硬さとの関係は、ほぼ1本の焼もどし母曲線で整理できた。そして、硬さと常温での衝撃値との関係から求めた結果、Fig. 11に示すように、FI材の衝撃値の方がより高い値を示した。これらの結果から、IHTの強靱化効果は、焼入れ方法や組織には左右されずに存在することがわかつた。

3.4 硬さと靱性におよぼす焼もどし条件の影響

IHTが、IHQの効果と切り離して単独でも優れた強

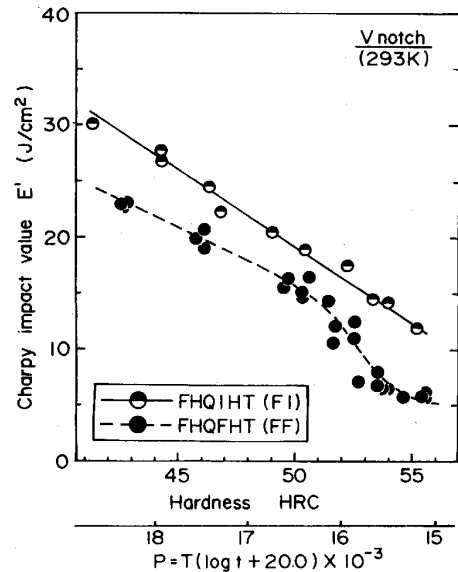


Fig. 11. Impact value of FHQIHT and FHQFHT materials.

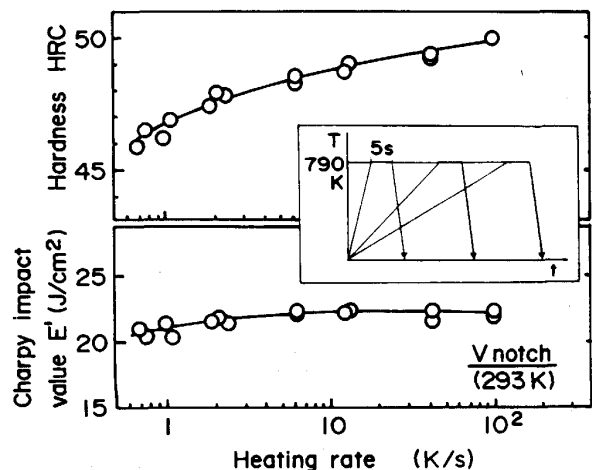


Fig. 12. Influence of tempering heating rate on hardness and impact value.

靱化効果を示すことが明らかになつた。そこで硬さと靱性におよぼすIHTの特徴である急速、短時間、高温加熱の効果を明らかにするために、焼もどしの加熱速度、加熱温度(焼もどし温度)および加熱時間(本項では保持時間)と硬さおよび常温での衝撃値との関係を求めた。なお、加熱には実験用IH装置を用いた。

3.4.1 焼もどし加熱温度の影響

焼もどし温度を790K、加熱時間を5sで一定として、加熱速度と硬さおよび衝撃値との関係を求めた。その結果、Fig. 12に示すように、硬さは、同じ焼もどし温度と加熱時間でも、加熱速度が小さくなると徐々に低下した。一方、衝撃値は、加熱速度が大きくなり、硬さが高くなるにもかかわらず、加熱速度が1K/sから10K/s

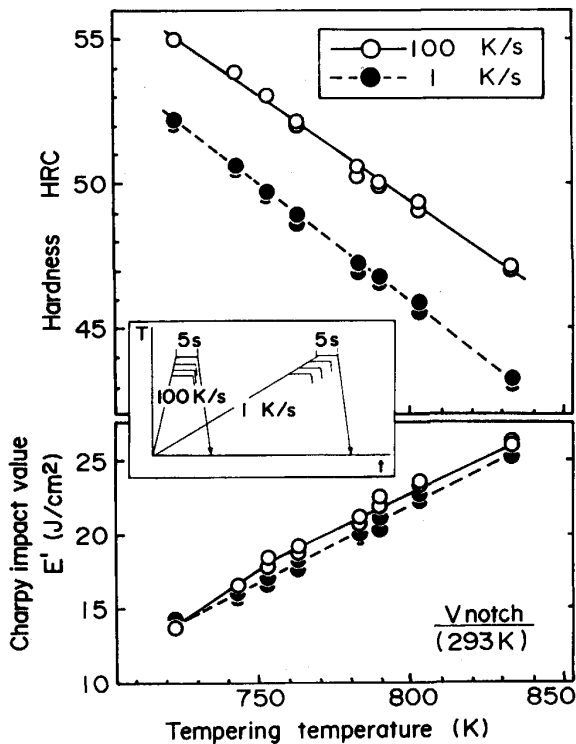


Fig. 13. Influence of tempering heating rate on the relation between tempering temperature and both hardness and impact value.

の間でむしろ徐々に高くなり、10 K/s 以上でも低下することなくほぼ一定の値を示すことがわかった。このように衝撃値の低下をまねくことなく高硬さ化が可能なことから、急速加熱焼もどしは靱性の向上に有利と考えられる。

また、加熱時間を 5 s で一定として、各焼もどし温度まで、IHT を想定した場合は 100 K/s で急速加熱し、FHT を想定した場合は 1 K/s で緩速加熱した場合の焼もどし温度と硬さおよび衝撃値との関係を求めた。その結果、Fig. 13 に示すように、同じ焼もどし温度の場合、急速加熱焼もどし材の方が硬さが高いにもかかわらず、衝撃値は、緩速加熱焼もどし材と同程度か若干優れた値を示した。すなわち、この結果からも、急速加熱焼もどしが靱性の向上に有利なことが明らかになった。

さらに焼もどし温度を 790 K で一定として、100 K/s で急速加熱および 1 K/s で緩速加熱した後の加熱時間と硬さおよび衝撃値との関係を求めた。その結果、Fig. 14 に示すように、加熱時間が 100 s を越えると、急速加熱焼もどし材と緩速加熱焼もどし材の硬さと衝撃値は、ともにほぼ一致した。このことは、急速加熱焼もどしにより得られる優れた強靱性を確保するには、短時間加熱焼もどしが必須条件であることを示していると考えられる。

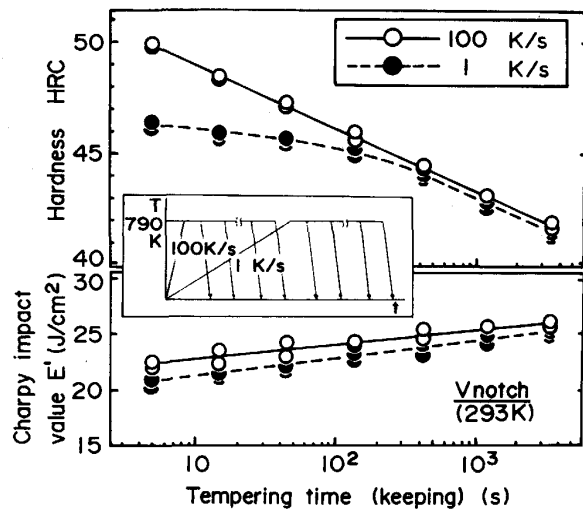


Fig. 14. Influence of tempering heating rate on the relation between tempering time and both hardness and impact value.

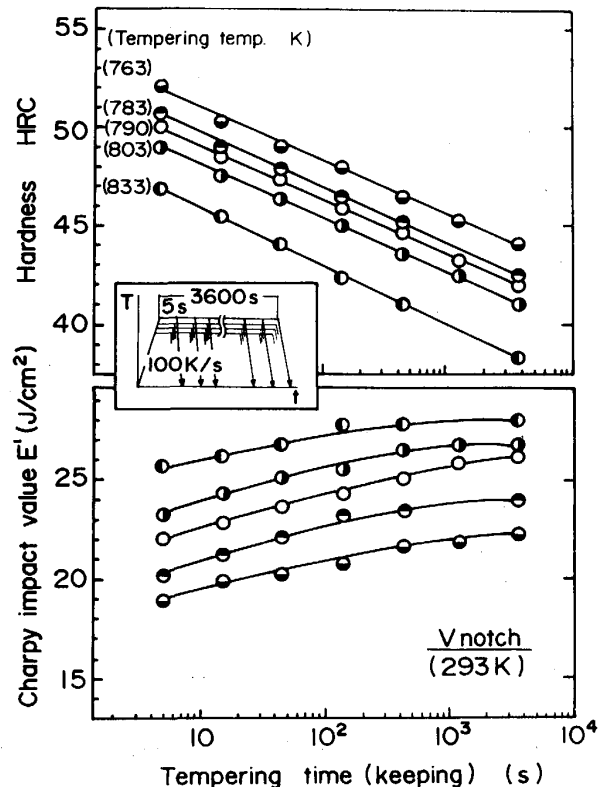


Fig. 15. Influence of tempering temperature and time on hardness and impact value.

3.4.2 焼もどし温度と加熱時間の影響

加熱速度を 100 K/s で一定として、焼もどし温度および加熱時間と硬さおよび衝撃値との関係を求めた。その結果、Fig. 15 に示すように、いずれの焼もどし温度の場合も、硬さは、加熱時間が長くなるとほぼ直線的に低下した。一方、衝撃値は、加熱時間が長くなると短時

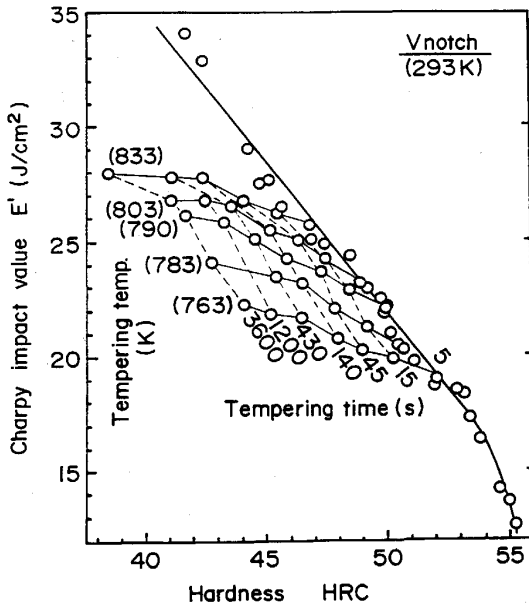


Fig. 16. Influence of tempering temperature and time on the relation between hardness and impact value.

間側では徐々に高くなるが、長時間側では同様の傾向を示すものの上昇率は低下した。すなわち、硬さが長時間側でも直線的に低下しているにもかかわらず、衝撃値は上昇しなくなるわけで、このことも、急速加熱焼もどしにより得られる優れた強靱化効果を確保するには、短時間加熱が必須条件であることを示していると考えられる。

Fig. 16 は、Fig. 15 と Fig. 5 で示した結果を合わせて、硬さと衝撃値との関係におよぼす焼もどし温度と加熱時間の影響を示したもので、同じ硬さを得るのに、より高温で、かつより短時間で焼もどしするほど、より高い衝撃値が得られることが明確に示されている。

これらの結果から、IHT の強靱化効果は、主に急速、高温加熱焼もどしに起因し、短時間加熱によつて確保されており、IHT の特徴である急速、短時間、高温加熱のいずれもが強靱化に有効なことが明らかになった。

3.5 FHT の場合の短時間加熱の強靱化効果

FHT のように、比較的加熱時間が長い場合の短時間加熱焼もどしの強靱化効果を明らかにするために、IHQ 材に総加熱時間 3600 s (3.6 ks) および 36 ks の FHT を加え、硬さと常温での衝撃値との関係を求めた。その結果、Fig. 17 に示すように、衝撃値は、加熱時間が短い方が若干高くなる傾向を示したが、II 材と総加熱時間が 3600 s の FHT 材との差を基準にすると、顕著な強靱化効果が得られるとは言い難い。このことから、短時間加熱焼もどしによる強靱化効果は、IHT のように

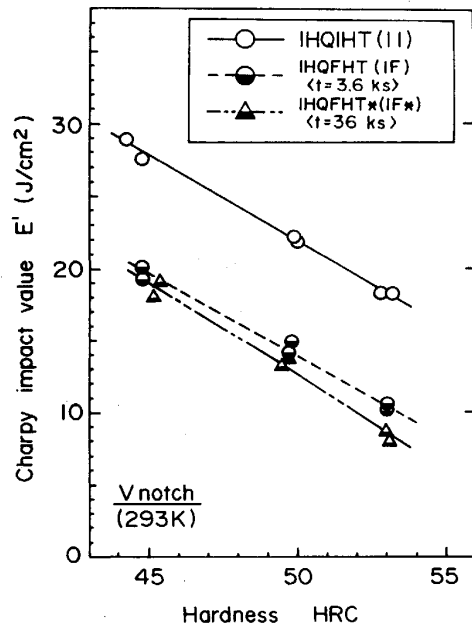


Fig. 17. Influence of FH tempering time on impact value.

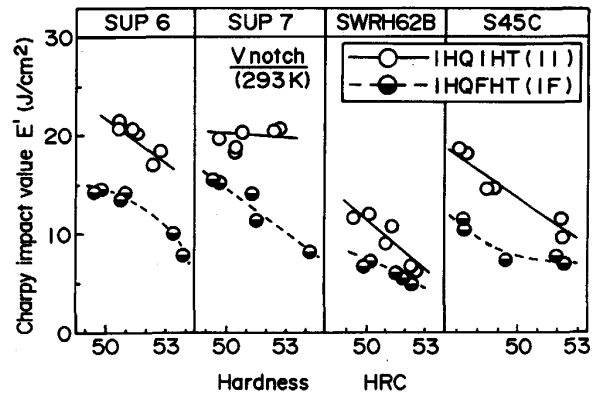


Fig. 18. Impact value of IHQIHT and IHQFHT materials of SUP 6, SUP 7, SWRH62B, and S45C.

加熱時間の絶対値が極めて小さい場合に、より明瞭に現れると考えられる。

3.6 SUP 12 以外の II 材と IF 材の靱性

IHT の優れた強靱化効果の普遍性を明らかにするために、前々報¹⁾ で用いたのと同じ Si-Mn 鋼 (SUP 6, SUP 7), C-Mn 鋼 (SWRH 62B), および S45C を供試鋼とした場合の II 材と IF 材の硬さと常温での衝撃値との関係を求めた。なお、供試材の線径はいずれも 12 mm で、熱処理方法と条件は、SUP 12 の場合と同一である。その結果、Fig. 18 に示すように、衝撃値は、各供試鋼とも II 材の方がより高い値を示した。これらの結果から、ばね鋼などの低合金鋼の範囲では、IHT の強靱化効果には普遍性があると考えられる。

3.7 IHT 材の組織の特徴の機械的性質

前々報¹⁾で、II が優れた強靱化効果を示す理由として、①微細結晶粒、②焼もどし脆化を軽減するような焼もどし組織、③残留 γ の効果を指摘した。したがって、IHT により優れた強靱化効果が得られるのは、主に焼もどし過程と関連の深い②③の効果と考えられる。

また、本実験結果から、II 材と IF 材とでは、焼もどしパラメーターが同じ場合、硬さや引張り強さは一致するが、延性や靱性は一致しないことがわかった。すなわち、硬さや引張り強さが、主に焼もどし過程でのマルテンサイトの分解の程度、析出した炭化物の量および消滅し再配列した後の平均転位密度などの熱力学的な反応の量に依存し、延性や靱性がこれらの反応の量に加えて、炭化物の析出形態や分布状態および転位の分布状態など反応の質にも依存すると考えると、本実験結果は、焼もどしパラメーターが焼もどし過程での反応の質までは表現できないことを示していると考えられる。また、このことは、II 材と IF 材とでは、同程度の硬さでも、微視的な焼もどし組織に差があることを示唆していると考えられる。そこで、次報では、このような微視的な焼もどし組織の差および本報で示した焼もどし方法と機械的性質との関係について考察する予定である。

4. 結 言

誘導加熱焼入れ焼もどし (II) が優れた強靱化効果を示す理由を明らかにするために、SUP 12 を供試鋼として、同じ方法で作製した焼入れ材を IHT または FHT した場合の強靱性をはじめとする種々の機械的性質を研究した。その結果、次のことが明らかになった。

(1) 焼入れ材が IHQ 材の場合、II 材は、同程度の硬さの IF 材に比べて、より優れた延性、靱性、破壊靱性、遅れ破壊特性、および疲れ特性を示す。すなわち、IHT は、IHQ と切り離して単独でも優れた強靱化効果を示

す。

(2) 焼入れ材が FHQ 材の場合も、FI 材は、同程度の硬さの FF 材に比べて、より優れた靱性を示し IHT の強靱化効果は焼入れ組織には左右されずに存在する。

(3) IHT の特徴である急速、短時間、高温加熱のいずれもが強靱化に有効である。

(4) SUP 6, SUP 7, SWRH 62B, および S45C を供試鋼とした場合にも、II 材がより優れた靱性を示し、IHT による強靱化効果には普遍性がある。

なお、引き続き、IHT 材の組織と機械的性質に関する研究を行い、その結果を続報する予定である。

最後に、本研究の遂行にあたり、終始ご指導を賜った京都大学工学部田村今男教授に深く感謝いたします。

文 献

- 1) 川寄一博, 千葉貴世, 高岡憲久, 山崎隆雄: 鉄と鋼, **73** (1987), p. 2290
- 2) 川寄一博, 千葉貴世, 古賀久喜, 山崎隆雄: 鉄と鋼, **73** (1987), p. 2298
- 3) 高橋秀雄: 京都大学学位論文 (1966)
- 4) 水馬克久: 熱処理, **6** (1966), p. 26
- 5) I. F. LIBSH and A. E. POWER: Metal Progress, **58** (1950), p. 176
- 6) 伊藤亀太郎, 山本一雄, 神田光雄, 矢崎陽一, 上野正勝, 東山博吉: 製鉄研究, **297** (1979), p. 27
- 7) 志賀千晃, 波戸村太根生, 鎌田晃郎, 大坪 宏, 中沢正敏, 北川正樹: 鉄と鋼, **66** (1980), S1115
- 8) 大谷泰夫, 橋本 保, 藤城泰文: 鉄と鋼, **66** (1980), S1116
- 9) 山崎隆雄, 山下英治: 熱処理, **20** (1980), p. 181
- 10) 鉄鋼材料 (講座・現在の金属学, 材料編 4) (日本金属学会編) (1985)
- 11) 井上 毅: 鉄と鋼, **66** (1980), p. 1532