

これらの歪比から考察すると、焼もどし温度の影響は平滑試片のほうが著しく、また静的より衝撃のほうが K の値が大きい。

3.3 衝撃エネルギー

従来、低温における衝撃値を知るためのシャルピー試験、低温引張衝撃、また高温や高速衝撃など非常に多くの衝撃研究が報告されている。ここでは平滑および切欠試片の衝撃性質を、熱処理温度を変化させながら考察した。Fig. 2 の e と f はバネ鋼と軟鋼の衝撃値を示す。衝撃エネルギー-温度曲線上の遷移点を、V型切欠に対して規定した、ASTM や BS などによる T_{15} (15ft-lb) はバネ鋼では 300°C に遷移点が現われ、また軟鋼では遷移点が現われない。延性破面遷移温度を考察すると、バネ鋼は 400°C (平滑)~450°C (切欠) で遷移が起こっている。また軟鋼は 200°C ですでに、破面遷移が現われている。

切欠試片の衝撃値はバネ鋼と軟鋼のいずれも熱処理温度の変化の影響が少ないが、平滑試片は大きい。平滑および切欠試片の衝撃値比を β とすれば、

$$\beta = E_A(\text{平滑試片の衝撃値}) / E_B(\text{切欠試片の衝撃値}) \dots\dots\dots (5)$$

バネ鋼および軟鋼の β の値は、Fig. 3 の結果によると、

(a) バネ鋼:

$$\beta_K = 1.05 \sim 1.2 \text{ (100} \sim 300^\circ\text{C の間)}$$

$$\beta_K = 2.5 \sim 4.45 \text{ (400} \sim 700^\circ\text{C の間)}$$

(b) 軟鋼:

$$\beta_M = 1.5 \sim 2.8 \text{ (100} \sim 800^\circ\text{C の間)}$$

次に衝撃エネルギーと静的エネルギーを比較すると衝撃のほうが大きかった。衝撃エネルギーは衝撃試験機に指示されたものを使うこともできるが、オッシロスコープの衝撃荷重時間曲線を、CLARK, BARON などの方法により、衝撃荷重時間曲線を作り、これと静的荷重-伸び曲線をプランメーターで測定し一部比較した。従来多くの研究では焼鈍材や冷間加工材に対し、常温や低温における衝撃エネルギーが静的エネルギーよりも大きいことが報告^{1)~3)}されている。本実験では熱処理された平滑および切欠き試片に対し、常温でも成立することを確認した。

4. 結 言

1. 平滑および切欠試片の衝撃抗張力は熱処理温度を変化させた場合、焼鈍平滑試片の抗張力より 1.25~4.5 倍も大きかった。
2. 平滑および切欠抗張力の比は、バネ鋼と軟鋼いずれも一定の値、0.75 に接近していた。また焼もどし温度によつて抗張力は異なるが、静的より衝撃のほうが大きい。
3. 歪は温度によつて非常に大きい変化を示すが、衝撃と静的歪の間には差が少ない。しかし平滑と切欠歪の比は衝撃のほうが大きく、また軟鋼よりバネ鋼のほうが温度の影響は大きい。
4. 衝撃値は平滑試片のほうが大きく、また焼もどし温度の影響も著しい。

文 献

1) D. S. CLARK & D. S. WOOD: Trans. Amer.

Soc. Metals, 42 (1950), p. 45

2) 作井誠太, 大森正信: 鉄と鋼, 45 (1959), p. 451
 3) H. G. BARON: J. Iron & Steel Inst (U. K.), 182 (1956), p. 354
 4) D. S. CLARK: Trans. Amer. Soc. Metals, 46 (1954), p. 34
 5) 作井誠太, 佐藤公子, 秋葉久三郎: 金属学会誌, 20 (1959), p. 332
 6) M. MANJOINE & A. NADAI: Proc. ASTM, 40 (1940), p. 822

(130) 衝撃引張試片における機械的性質に関する研究

(鉄鋼の切欠および平滑試片における熱処理温度と衝撃性質の関係—II)

東北大学, 金属材料研究所

○ 廉 永 夏

Studies on the Mechanical Properties of Tensile Impact Specimen.

(Relations of heat-treated temperature and impact properties for both notched and un-notched specimen of the steels—II)

Yung-Ha YUM.

1. 緒 言

第1報に引き続いて、熱処理温度の変化が平滑および切欠試片および影響を、オッシロスコープ写真による衝撃荷重-時間曲線および、静的荷重-伸び曲線の解析によつて、バネ鋼と軟鋼の機械的性質を考察した。

2. 実験結果および考察

実験結果によると、バネ鋼と軟鋼のブリネル硬さ (H_B) と衝撃値の変化などと焼もどし温度の関係は、Fig. 1 に示した。前報にて衝撃値と焼もどし温度関係は説明したので、ここでは硬さ-衝撃値の関係について考察する。図で硬さは温度上昇とともに減少し、衝撃値は増加を示すが、バネ鋼の場合その変化が軟鋼に比して複雑である。普通焼入れ、焼もどしされた炭素鋼の硬さ (H_B) と、顕微鏡組織の間には密接なる関係があるので、本研究の試片の硬さを知ることによつて、その組織および衝撃値の推定も可能になるものと思う。

Fig. 2 [A] は衝撃エネルギー-硬さ曲線である。曲線上の 1, 2, 3 などの数字は、それぞれ焼もどし温度 100°, 200°, 300°C などの略字である。バネ鋼の場合切欠衝撃値は、焼もどし温度の上昇とともに増加するが、 $H_B = 350$ 付近までは、ばらつきが大きく、 $H_B < 350$ ではほぼ安定して変化は小さい。平滑試片は焼もどし温度の高い 500°~700°C でやや安定性を示している。軟鋼の場合、平滑試片の衝撃値と硬さの間には、一定の関係が成立している。すなわち、

$$E_{MA} = -\frac{1}{16}H_B + 24 \dots\dots (H_B = 110 \sim 250 \text{ の範囲})$$

また切欠試片では、焼もどし温度の変化によつて多少差異はあるが、硬さの変化に比して、衝撃値の変化はきわ

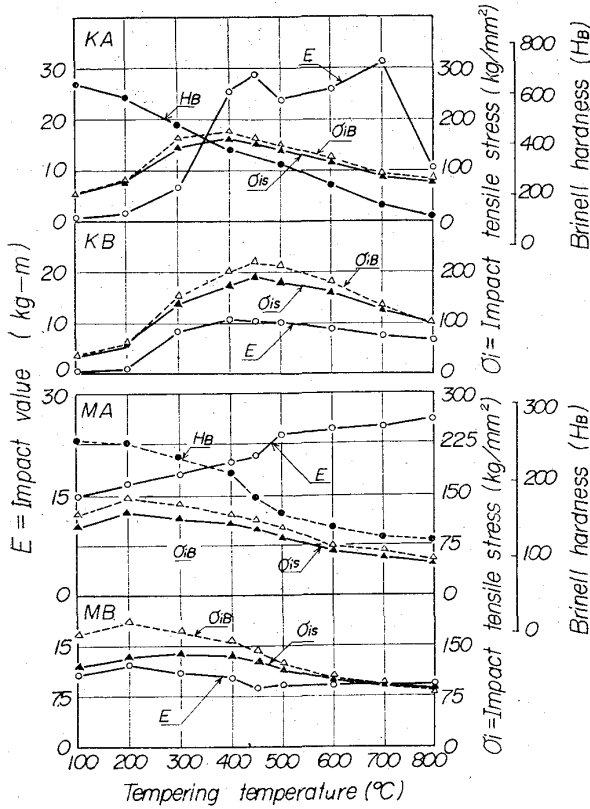


Fig. 1. Impact value, impact stress, Brinell Hardness versus tempering temperature curves for spring steel (KA, KB) and mild steel (MA, MB).

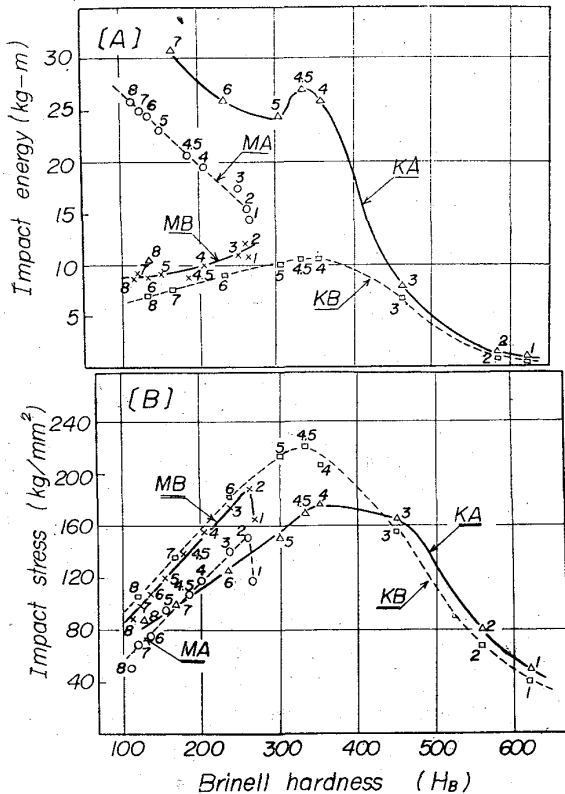


Fig. 2. Impact energy-hardness [A] and impact stress-hardness [B] relations for spring and mild steel.

めて少ないことがわかる。以上のことから平滑試片の衝撃値は、 $H_B < 300$ では硬さの減少とともに、ほぼ直線的に増加するが、切欠試片の衝撃値は硬さの変化に比してきわめて小さい。

2.1 降伏点、抗張力および衝撃値

Fig. 1 は KA, KB, MA および MB の降伏点 (σ_s)、抗張力 (σ_B) および衝撃値 (E) 曲線と焼もどし温度の関係を示したものである。KA と KB の場合、 200°C 以下では降伏点と抗張力が、ほとんど一致しているが、 300°C 以下では焼もどし温度上昇とともに、降伏点が明りように現われた。実験結果を見ると、衝撃降伏点 (σ_{is}) が静的降伏点 (σ_{ss}) よりも大きい。すなわち、

$$\sigma_{is} > \sigma_{ss} \dots\dots\dots (1)$$

衝撃降伏点と静的抗張力 (σ_B) とを比較すれば、 100°C ~ 200°C の間では、差異が少ないが、 300°C 以上では衝撃降伏点のほうが大きい。すなわち、

$$\sigma_{is} > \sigma_B \dots\dots\dots (2)$$

(a) バネ鋼:

$$\sigma_{is} = (1.07 \sim 2.3) \sigma_B, \text{ (平滑)},$$

$$\text{また } \sigma_{is} = (1.32 \sim 2.52) \sigma_B \dots\dots \text{(切欠)}$$

軟鋼の場合も上記 (1) と (2) 式の衝撃降伏点に関する一般的事柄は、類似した傾向を示していた。軟鋼では焼もどし温度、 100°C ~ 800°C の間では次の範囲であった。

(b) 軟鋼:

$$\sigma_{is} = (1.14 \sim 2.9) \sigma_B, \text{ (平滑)},$$

$$\text{また } \sigma_{is} = (1.8 \sim 3.25) \sigma_B \dots\dots \text{(切欠)}$$

WHITE¹⁾らも、焼鈍した平滑試片に対し衝撃降伏点のほうが大きい事実を認めている。

バネ鋼および軟鋼の衝撃値と衝撃引張応力の関係を Fig. 3 [A] に示した。軟鋼の平滑および切欠試片においては、ほぼ一定の関係が保たれているが、しかしバネ鋼の場合には非常に複雑な変化を示している。平滑と切欠試片の曲線が、焼もどし温度 100°C ~ 300°C の間では、ほぼ重なり合うが、平滑試片においては 300°C ~ 400°C の間で急激な変化を示し、 500°C 以上では応力の減少とともに衝撃値の増加を示している。切欠試片の場合、 400°C ~ 800°C の間では軟鋼の切欠試片に準じた変化を示している。

Fig. 3 A から次の 3 型の傾向を考察することができる。

- (i) a 型……衝撃値と衝撃応力が反比例するもの (例-MA)
- (ii) b 型……衝撃値と衝撃応力が正比例、または衝撃値のほぼ一定なもの (例-MB と KB の一部)
- (iii) c 型…… a 型と b 型の組合わせたもの (例-KA)

Fig. 3 [A] から a 型は軟鋼および 500°C ~ 700°C に焼もどされたバネ鋼がこれに属している。b 型は切欠試片および脆性材質がこれに属する。c 型は熱処理の影響により a 型と b 型のいずれもなれるもので、硬さの大きい合金鋼などがこれに属する。c 型を衝撃構造物に使用するときには、熱処理条件に特別の注意を要する。

2.2 衝撃値と衝撃歪

前報で衝撃歪と静的歪はほとんど差がないことが明ら

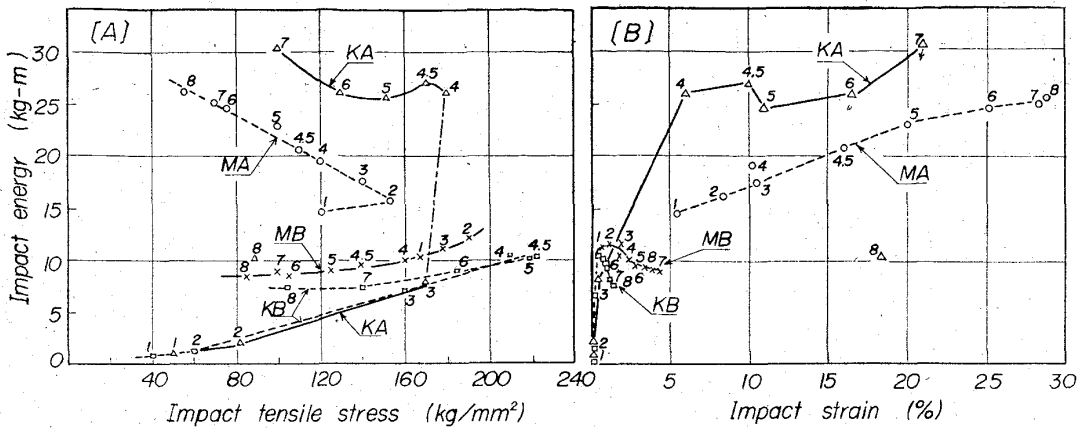


Fig. 3. Impact energy-impact tensile stress curves [A] and impact energy-impact strain curves [B].

かになっている。ここで、衝撃値と衝撃歪の関係を Fig. 3 [B] によつて考察すると、平滑と切欠試片では、曲線の形に相違がある。平滑試片においては、歪の増加とともに衝撃値は増加を示しているが、切欠試片は温度が上昇して塑性歪が増加すると、衝撃値は減少している。しかも歪も衝撃値も非常に小さい。

2.3 衝撃時間

衝撃荷重下における、試片の破壊に要した衝撃時間と熱処理温度の関係を Fig. 4 [A] に示した。バネ鋼と軟鋼の平滑試片は、Fig. 4 [A] のごとく焼もどし温度 700°C で最大値を示し、衝撃時間も長い。バネ鋼の切欠試片は 700°C まではほぼ直線的増加を示して、最大を

示したが、軟鋼の切欠き試片の場合は焼もどし温度の変化にもかかわらず、100~800°C の間で、衝撃時間は短く、ほとんど変化していない。Fig. 4 [A] の結果から、バネ鋼の各試片は軟鋼のそれぞれに比して衝撃時間が短い。一般に切欠試片は衝撃時間が短くて衝撃荷重に弱い。平滑

試片の場合、400°C 以上で焼もどされたものは、衝撃時間が長くて、衝撃荷重に耐える能力が大きい。それゆえ、従来切欠試片の衝撃結果によつて、衝撃荷重に対する適性を判定したり、または設計資料としたのは考慮すべき点ではないかと思う。平滑構造物には平滑試片による、衝撃資料を使用すべきである。

2.4 衝撃速度および歪速度

衝撃による試片の破壊前後のハンマ速度、 v_1 と v_2 は、次式によつて容易に求められる。

$$W_T H_1 = 1/2 \times m v_1^2 \dots\dots\dots (3)$$

$$W_T H_1 - E = 1/2 \times m v_2^2 \dots\dots\dots (4)$$

ここで W_T はハンマの重さ、 H_1 はハンマの高さ、 E は試片の衝撃値である。一般に衝撃荷重作用途中の速度 v は、均一に減少しているのではなく、 $v_1 - v_2$ の間では常に変化しているので、衝撃荷重 P 、時間 t_n と t_{n+1} の間では、

$$v_n = \frac{1}{m} \int_{t_n}^{t_{n+1}} P dt \dots\dots\dots (5)$$

で表わされるので歪速度も変化する。それで一定の衝撃速度で実験しようとするれば、衝撃試験機の容量を非常に大きくしなければならない。標準 30-kg m では容量が小さすぎる。本実験における衝撃中、材料の抵抗による衝撃速度の変化を、衝撃速度減少率 (ϕ) で表わすと、

$$\phi = (v_1 - v_2) / v_1 (\%) \dots\dots\dots (6)$$

(6) 式による ϕ の変化を、焼もどし温度について図示すれば Fig. 4 [B] の ㉑ スケールのごとくなる。各試片の ϕ の変化は衝撃値と焼もどし温度の関係とほぼ類似していることがわかる。

次に衝撃歪速度の焼もどし温度に対する変化は、衝撃歪と衝撃時間の関係からも求められるが、ここでは上記衝撃前後の速度による、衝撃平均速度で、歪速度を計算し、図示すれば、Fig. 4 (B) の ㉒ スケールのごとくなる。本実験では最大歪速度 $1.15 \times 10^2 \cdot 1/s$ を起点として、減少している。一般に切欠試片の歪速度は平滑試片に比して大きい。したがつて、速度減少率も小さい。速度減少率が大きい延性材質ほど、衝撃値が大きいことがわかる。

本実験の衝撃 (歪速度 $1.15 \times 10^2 \cdot 1/s$) と静的 (歪速度 $3.7 \times 10^{-3} \cdot 1/s$) における、歪速度の比はほぼ

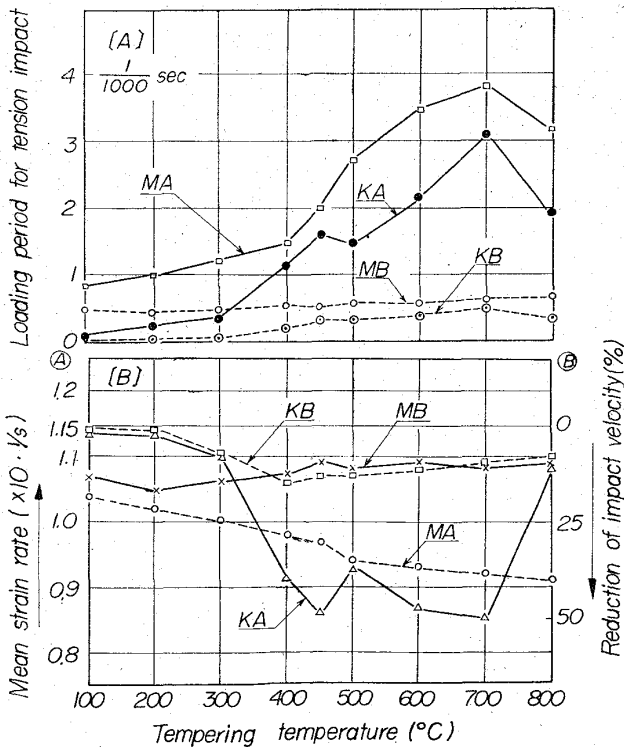


Fig. 4. [A] loading period-tempering temperature curves, and [B] strain rate and reduction of velocity ratio-tempering temperature curves.

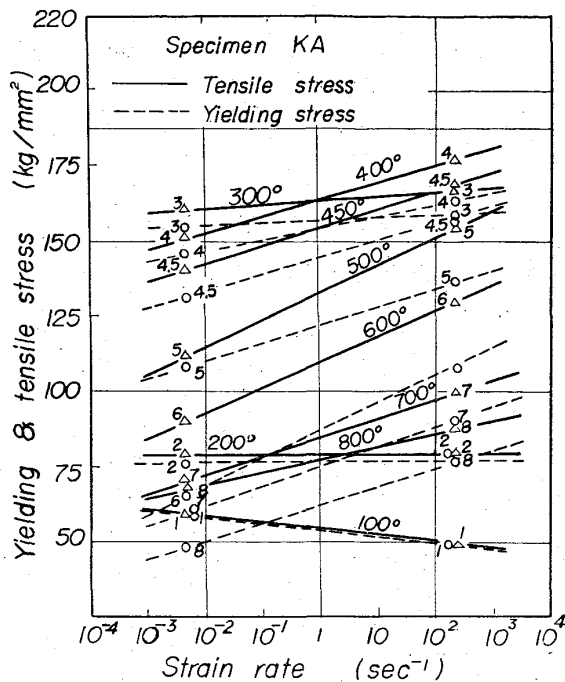


Fig. 5. Yielding and tensile stress-strain rate curves.

30,000 : 1 である。歪速度の影響をバネ鋼, 軟鋼の降伏点および抗張力について考察すれば, バネ鋼の平滑試片の場合, Fig. 5 のごとくなる。ここで実線は抗張力, 点線は降伏点を示す。

Fig. 5 の各曲線は次式によつて表わされる。

$$\sigma_R = a \log \dot{\epsilon} + b \dots\dots\dots (7)$$

ここで, σ_R は降伏応力または抗張力 (kg/mm^2), $\dot{\epsilon}$ は歪速度 (sec^{-1}), a と b は常数 ($\text{kg} \cdot \text{sec}/\text{mm}^2$) である。Fig. 5 の各曲線の方向は, 焼もどし温度と関連があるように思われる。直線の勾配は, 常数 a が焼もどし温度 300°C 以下の場合には, 非常に小さい。すなわち硬さの大きい脆性材質では a が小さく, 焼もどし温度の高い延性材質では a が大きい。すなわち, バネ鋼平滑試片 KA の抗張力の a の値は,

$$a_B = -2.4 \sim 1.6 \text{ (} 100 \sim 300^\circ\text{C 間)},$$

$$\text{また } a_B = 4.1 \sim 8.8 \text{ (} 400 \sim 800^\circ\text{C 間)}$$

また降伏点に対する a の値は,

$$a_S = -2.4 \sim 0.6 \text{ (} 100 \sim 300^\circ\text{C 間)},$$

$$\text{また } a_S = 3.6 \sim 8.2 \text{ (} 400 \sim 800^\circ\text{C 間)}$$

抗張力と降伏点に対する a の値は, 抗張力のほうが多少大きい傾向を示していた。バネ鋼の切欠試片も平滑試片の Fig. 5 に類似した曲線が得られた。平滑試片と切欠試片の a の値を比較すると, 切欠き試片のほうが大きかった。

上記の結果からバネ鋼の降伏および抗張力に対する歪速度の依存性の大小は, a の値の大きさによつて示されることがわかる。軟鋼の降伏点と抗張力に対する歪速度の影響もバネ鋼に類似していたが, 軟鋼のごとき延性材では, a の値に負数は現われず, $100 \sim 800^\circ\text{C}$ の間で,

$$a_B = 2.8 \sim 10.6 \text{ (平滑)}, \text{ また } a_B = 3.1 \sim 9.2 \text{ (切欠)}$$

であつた。

軟鋼の焼鈍材に対する作井²⁾らの研究では歪速度,

($10^{-3} \sim 10^{+3.1}/\text{s}$ のオーダー) の影響を $-196 \sim +20^\circ\text{C}$ の間で測定し, $a_B = 3.0 \sim 10.6$ を報告している。この値は本実験における軟鋼の焼もどし温度, $100 \sim 800^\circ\text{C}$ に対する a の値とよく一致している。また EVERS³⁾ は純鉄の単結晶に対し歪速度 ($10^{-4} \sim 10^{-2} \cdot 1/\text{s}$ のオーダー) を変化させながら, $-65 \sim +23^\circ\text{C}$ の範囲で, 降伏応力に対する $a_S = 1.5 \sim 4.3$ を報告している。

Fig. 5 の曲線から考察すると, 歪速度の変化による降伏点と抗張力におよぼす影響は, 熱処理温度変化による影響よりはるかに小さいことがわかる。

2.5 衝撃抗張力と硬さ

衝撃応力と焼もどされた試片の硬さの関係を Fig. 2 [B] に示した。共通した傾向としては, 焼もどし温度上昇と衝撃抗張力は増加し, 硬さは減少する。しかし衝撃抗張力が最大値に達した後, 硬さの減少とほぼ比例して減少している。この比例関係が成立しない高い硬さのほうでは, 衝撃応力はばらつく。Fig. 2 [B] の直線部分の衝撃抗張力 (σ_{IB}) と硬さ (H_B) の間には次の関係が成立している。

$$\sigma_{IB} = AH_B + B \dots\dots\dots (8)$$

ここで, A と B は常数である。Fig. 2 [B] から,

(1) バネ鋼 ($H_B < 300$):

$$\sigma_{IB} = 1.08 H_B + 30 \dots\dots KA \text{ 平滑試片}$$

$$\sigma_{IB} = 0.66 H_B + 30 \dots\dots KB \text{ 切欠試片}$$

(2) 軟鋼 ($H_B < 260$):

$$\sigma_{IB} = 0.59 H_B + 2 \dots\dots MA \text{ 平滑試片}$$

$$\sigma_{IB} = 0.65 H_B + 20 \dots\dots MB \text{ 切欠試片}$$

切欠き試片は成分の相違にもかかわらず, バネ鋼と軟鋼の衝撃抗張力-硬さ曲線の勾配が, ほとんど一致しているのは注目すべき事実である。Fig. 2[B] のバネ鋼では $100 \sim 300^\circ\text{C}$ の間, 軟鋼では $100 \sim 200^\circ\text{C}$ の間で, 衝撃抗張力と硬さ曲線は相互反比例を示している。しかも各試片は焼入れ硬化による内部応力の不均衡でばらつきが現われ, この反比例関係は, 脆性と密接な関連があるようである。

3. 結 言

1. 平滑と切欠試片の衝撃値と硬さの関係を考察した。
2. 衝撃降伏点は静的降伏点および抗張力より大きいこと。衝撃値と衝撃応力の変化を 3 型に分類し考察した。
3. 衝撃歪と衝撃時間により, 平滑および切欠試片の衝撃荷重に対する能力を検討した。
4. 降伏点および抗張力への歪速度の影響は焼もどし温度の影響に比してきわめて小さい。
5. 衝撃抗張力と焼もどし硬さは正比例関係が成立する。

文 献

- 1) M. P. WHITE: J. Appl. Mechanics, 16 (1949), p. 39
- 2) 作井・中村・大森: 鉄と鋼, 49 (1963), p. 996
- 3) M. EVERS: Z. Metallkunde, 52 (1961), p. 359