

工具鋼 SKD 11 の機械的性質

田 中 義 勝*・岩瀬谷 正 男**

Mechanical properties of tool steel SKD11

Yoshikatu TANAKA and Masao IWASEYA

要 旨

温間における工具鋼 SKD 11 の機械的性質の変化について、静的および動的曲げ試験、硬さ試験により検討した。

300℃～500℃の加熱により、硬さ・曲げ応力はやや低下したが、衝撃値・曲げ仕事量・たわみなどの機械的性質はやや向上した。

Synopsis

The changes of mechanical properties of tool steel SKD 11 by heating at warm temperature have been investigated, by static and dynamic bending test and hardness test. By heating in the temperature range 300-500℃, hardness and bending stress was slightly decreased, but the other mechanical properties such as impact value, static bending toughness, and deflection was slightly increased.

I 結 言

冷間工具鋼の機械的性質に関しては多くの報告がある^{1)~8)}。しかし、それらは殆んど室温における機械的性質に関するものである。冷間工具鋼であるから原則的に室温において使用されることを考慮すれば当然のことである。

ところが工具鋼は苛酷な条件下で使用されることが多いために、冷間加工と云えども工具は使用中に、ある程度の温度上昇が起ると云われている⁹⁾¹⁰⁾。また近年は塑性加工における変形抵抗の減少、あるいは被加工材の機械的性質の改善等の観点から温間における塑性加工についても検討されている^{11)~13)}。このような場合には、工具材料も当然ある程度の温度に達することになる。従ってこれらの加工に使用される工具材料については、室温における機械的性質について考慮したのみでは充分とは云えず、温間における機械的性質についても

考慮する必要があると考えられる。ところが工具鋼の温間における機械的性質に関する報告は極めて少ないようである。そこで、最も一般的に使用されている冷間工具鋼の一種である SKD 11 について、室温から 600℃までの温度範囲において、衝撃試験、静的曲げ試験、硬さ試験を行ない、室温における試験結果と比較検討した。

II 試料および実験方法

実験に使用した試料は市販の工具鋼 SKD 11 で板厚 27 mm、板巾 200 mm の圧延材である。その化学成分を第 1 表に示す。

素材を鋸盤にて切断した後、10 mm×10 mm×55 mm で中央部に 10 R、深さ 2 mm のノッチ付

第 1 表 試料の化学成分 (Wt %)

C	Si	Mn	Cr	Mo	V
1.40 ~1.60	< 0.40	< 0.50	11.00 ~ 13.00	0.80 ~1.20	0.20 ~0.50

* 助教授 機械工学科

** 技 官 機械工学科

き衝撃試験片, $6\text{ mm} \times 6\text{ mm} \times 55\text{ mm}$ の静的曲げ試験片, および硬さ試験片に切削加工した。試験片作成にあたっては, 試験条件が一定になるように, 素材の圧延方向, 圧延面等には充分注意した。

次に, 1020°C 40 分間加熱後空冷焼入し, 200°C 1 時間の焼戻しをした。焼入には真空炉を, 焼戻しにはオイルバスを使用した。

SKD 11 の焼入, 焼戻しにおいては, 加熱温度および加熱時間によって, 炭化物の溶解の程度および残留オーステナイト量が異なるので,

その機械的性質も異なるが^{1),2)}, が, 本実験においては, SKD 11 の最も一般的な熱処理条件と考えられる焼入・焼戻し温度とした。

温間試験のための試験片加熱には, 横型管状電気炉を使用した。各試験温度に設定した炉に試験片を装入し, 12 分間加熱した場合と, 60 分間加熱した場合とについて, 温間および室温に冷却後の試験を行なった。装入後 12 分という加熱時間は, 装入された試験片が炉の設定温度に到達するまでに要する時間を, 試験片に熱電対を埋め込んで測定した結果から得た時間, すなわち試験片が試験温度に達した直後である。一方 60 分というのはその温度における組織変化, すなわち焼戻しが進行した後と考えられる時間である。

衝撃試験は $30\text{ kg}\cdot\text{m}$ シャルピー式衝撃試験機を用い, ハンマー持上角度 90° で行なった。この角度から落下させたハンマーの最大速度は約 3.8 m/sec である。温間衝撃試験では炉から試験片を取出した後, 試験するまでに約 5 秒間を要し, その間に試験片の温度は幾分低下し, 例えば, 500°C では約 15°C であるがこの温度低下は無視した。

静的曲げ試験は第 1 図に示す曲げ試験装置を用い, 油圧式万能試験機により行なった。曲げ試験装置の主要部は, 加熱炉, 試験片支持台, 圧子, 変位検出器, および X-Y 記録計よりなり, 試験中の温度を一定に保持し, 曲げ荷重-たわみ線図を自動記録するようになっている。試験片を前述の加熱炉である程度加熱した後, 試験温度に設定した曲げ試験装置にセットし, 所定の加熱時間に達した後変形速度 $1.0\sim 1.5 \times 10^{-5}\text{ m/sec}$ で試験した。試験後 X-Y 記録紙より, たわみ, 曲げ仕事量, 曲げ応力等を求めた。

硬さ測定には, 室温では標準型ビッカース硬度計を使用し, 温間では高温ビッカース硬度計・ショアー硬度計を併用したが全て Hv で表わした。

III 実験結果および考察

III・1 加熱温度と機械的性質

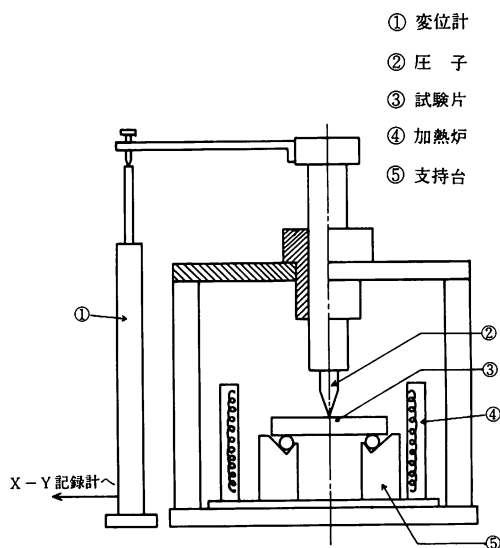
12 分加熱時および加熱冷却後の試験結果を第 2 図に示す。

衝撃値は大きな変化は見られないが, 300°C 以上の温間においては僅かに大きくなる傾向がある。

硬さは温間においては低下の傾向があるが, 室温に戻した後では 500°C まで大差ない。これは焼戻しにおける二次硬化の影響によるものである。すなわち SKD 11 は $400\sim 550^{\circ}\text{C}$ の焼戻しにおいて顕著な二次硬化現象を伴うからである。二次硬化現象は焼入条件によってかなり異なるが, 本実験における焼入条件では第 3 図に示す如くである。従って他の機械的性質においてもこの影響により, 加熱温度 $500\sim 550^{\circ}\text{C}$ を境として明らかな差を生ずる。

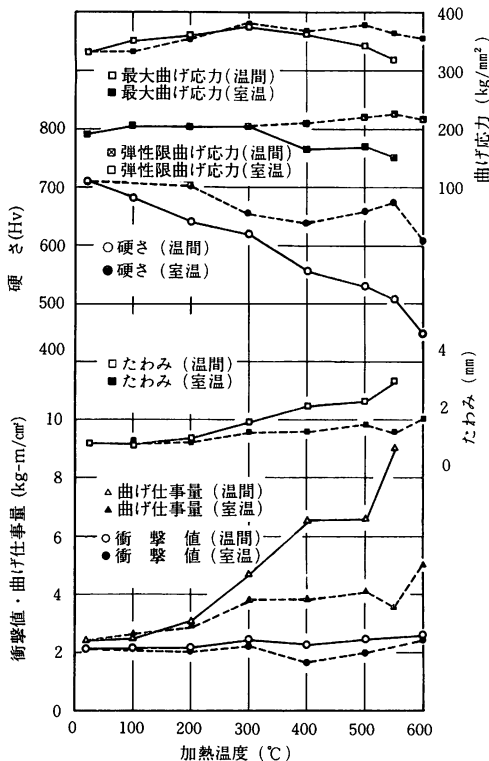
静的曲げ試験における曲げ仕事量は, 温間では 200°C 以上になると上昇し, 500°C 以上では著しく上昇する。室温試験においても, 加熱温度 300°C 以上では上昇するが, 温間に比べると変化は僅かである。また 550°C でやや低下しているがこれは二次硬化によるものであり, 曲げ応力, 硬さにもこの影響が現われている。加熱時間が短いため第 3 図の二次硬化より若干高温側に現われている。

加熱温度の変化に伴う曲げ仕事量の変化はた

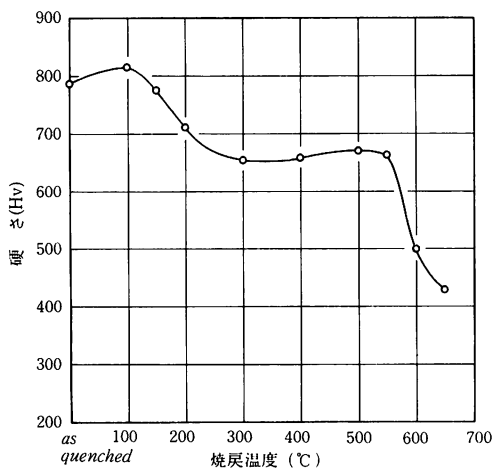


第 1 図 曲げ試験装置

わみ量の変化と非常に類似している。温間における曲げ荷重とたわみの関係を第 4 図に示したが、加熱温度が高くなるにつれてたわみが増加する様子が明らかである。第 5 図はたわみと曲げ仕事量の関係を示したものであるが、曲げ仕事量は温



第 2 図 加熱温度と機械的性質の関係 (12分)



第 3 図 焼戻温度と硬さの関係

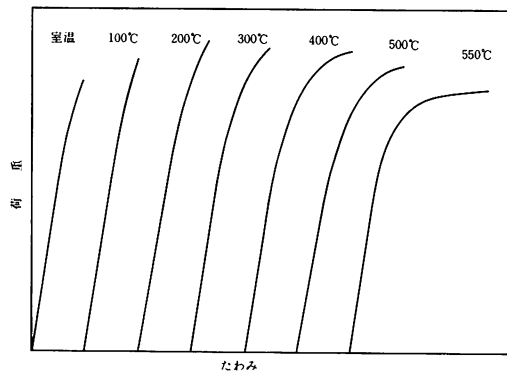
間・室温の区別なく、たわみによって殆んど決定づけられることがわかる。加熱温度の変化に伴う曲げ仕事量の変化は衝撃値の変化と比較して著るしく大きい。これは変形速度および試験片形状の相違によると考えられる。

曲げ応力については、温間では弾性限曲げ応力、最大曲げ応力共に 300℃までは僅かに上昇するが 400℃以上ではやや低下する。冷間では 500～550℃で二次硬化の影響が認められる。

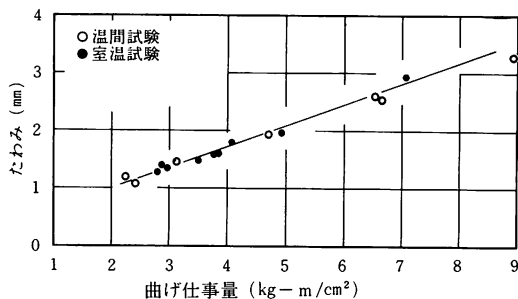
第 2 図を全体的に見ると 300℃までは温間と室温の試験結果に大きな差はないが、400℃以上では両者の差は明らかになる。従って室温における試験結果のみから温間における機械的性質を類推することは困難である。500℃まで加熱すると硬さは約 Hv 150 低下するが、工具材料として必要な硬さはまだ維持しており、曲げ応力は室温と殆んど変りなく、しかも靱性は向上するので、使用上好条件であると云える。

別な観点からさらに検討するために、第 2 図より硬さと他の性質の関係について第 6、7、図に示す。

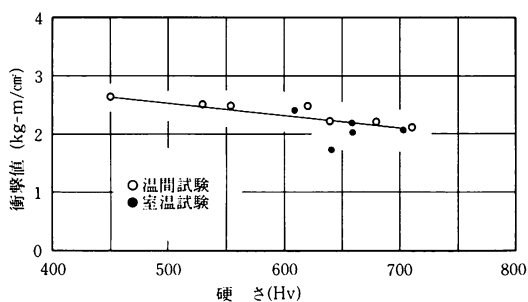
第 6 図より、温間・室温の区別なく硬さと衝撃



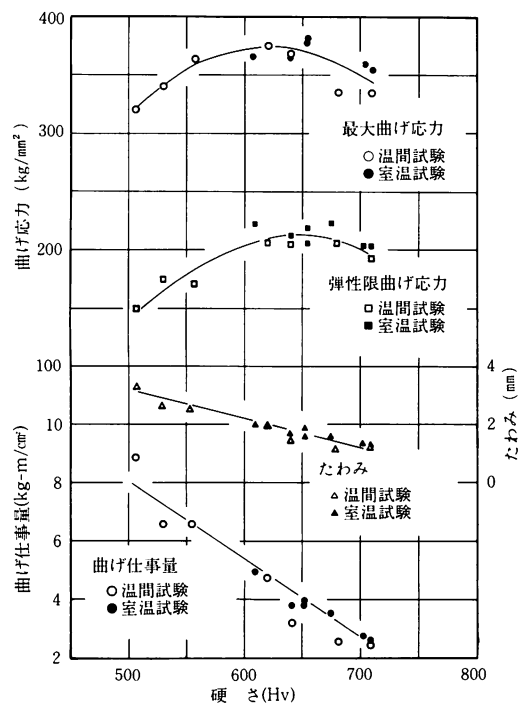
第 4 図 温間曲げ試験における荷重—たわみ線図



第 5 図 曲げ仕事量とたわみ量の関係



第6図 硬さと衝撃値の関係



第7図 硬さと曲げ試験結果の関係

値とは相反する性質であることがわかるが、Hv 500～700の範囲における衝撃値の変化は僅かである。

第7図より、硬さと曲げ仕事量・たわみとは相反する性質であることがわかる。弾性限曲げ応力・最大曲げ応力は硬さが増すにつれて上昇するが、ある硬さ以上になると逆に低下する。

第2図において、加熱温度が高くなるにつれて比較的大きな変化を示す硬さと曲げ仕事量について、変化の内容についてさらに検討してみる。

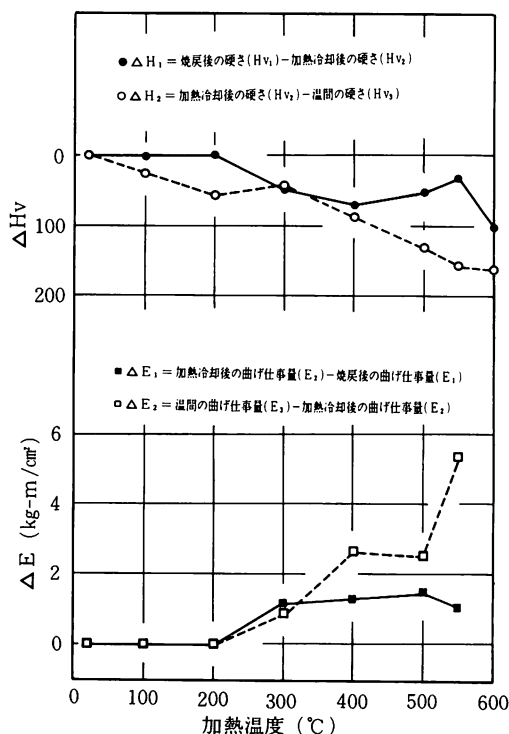
200℃焼戻し後の硬さを H_{V1} 、12分加熱冷却後の硬さを H_{V2} とし $\Delta H_{V1} = H_{V1} - H_{V2}$ とすれば、

ΔH_{V1} は加熱によって生じた組織変化による軟化量、すなわち焼戻しによる軟化量である。一方、温間における硬さを H_{V3} とし、 $\Delta H_{V2} = H_{V2} - H_{V3}$ とすれば、 ΔH_{V2} は組織的に同じであるが、温度が異なるために生ずる硬さの差と考えることができる。

同様に曲げ仕事量について、200℃焼戻し後の曲げ仕事量を E_1 、12分加熱冷却後の曲げ仕事量を E_2 、温間におけるそれを E_3 とし、 $\Delta E_1 = E_2 - E_1$ 、 $\Delta E_2 = E_3 - E_2$ とすれば、 ΔE_1 は加熱によって生じた組織変化による曲げ仕事量の増加量、 ΔE_2 は組織的には同じであるが温度が異なるために生じた曲げ仕事量の差と考えられる。加熱温度と ΔH_{V1} 、 ΔH_{V2} 、 ΔE_1 、 ΔE_2 の関係を8図に示す。

200℃までは ΔH_{V1} による軟化はなく、 ΔH_{V2} による変化のみであり、300℃以上では ΔH_{V1} による軟化も、 ΔH_{V2} による変化も生ずる。しかし、550℃までは ΔH_{V1} な大きな変化はなく、 ΔH_{V2} は温度につれて大きくなる。600℃では ΔH_{V1} すなわち焼戻しによる軟化が大きくなる。このことは第3図の焼戻曲線とよく一致する。

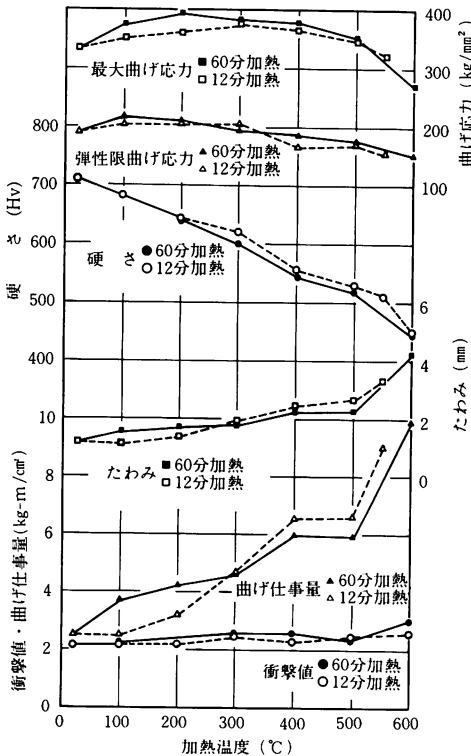
曲げ仕事量も550℃以下では ΔE_1 よりも ΔE_2 すなわち試験温度の影響の方が大きい。

第8図 加熱温度と ΔH_v ・ ΔE の関係

III・2 加熱時間と機械的性質

60 分間加熱した場合の試験結果を前述の 12 分間加熱の結果と対比して第 9 図に示す。60 分加熱の方が 100℃, 200℃ で曲げ応力, 曲げ仕事量が上昇する点異なるが, 全体的には 12 分加熱と大きな差はない。この結果から, 加熱時間の影響は加熱温度の影響に比べて少ないことがわかる。すなわち, 加熱による組織変化は温度によって大きな影響を受ける。しかし時間の影響も無視できない。そこで温度と時間の両者を考慮して焼戻しパラメーターで表示することがしばしば行なわれている。

本実験結果を焼戻しパラメーターで整理すると第 10 図のように 12 分加熱, 60 分加熱の区別なく一本の線図で示される。従ってパラメーターで示される範囲内ではあらゆる温度・時間における機械的性質を図から判断することが可能であると考えられる。このように整理しても温間と室温では明らかな差がある。またパラメーター 10 まではパラメーターが大きくなるにつれて差は大きくなる傾向がある。



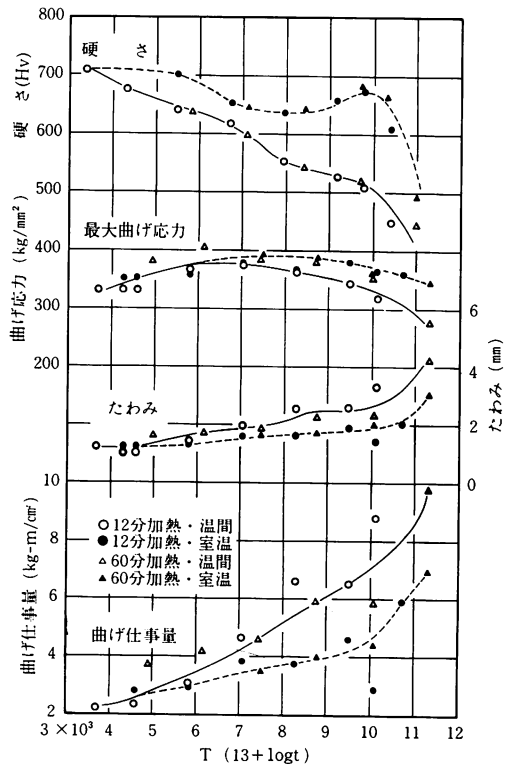
第 9 図 12 分加熱と 60 分加熱の比較

III・3 破断面の観察

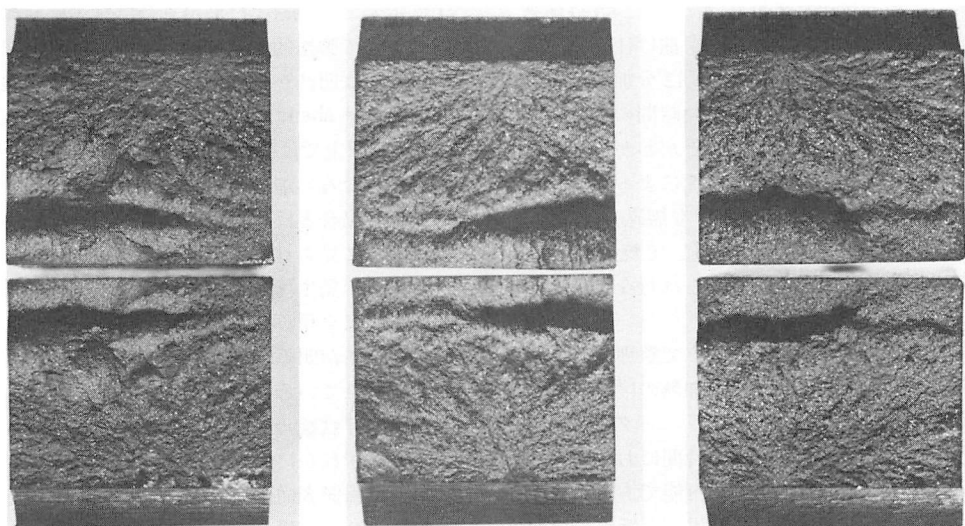
温間における衝撃試験片の破断面の写真を写真 1 に示す。室温および低温加熱試験の破断面は比較的平坦で脆性的であるが, 400℃ 以上の温間試験の破断面は凹凸が激しくなり, またノッチ底附近の側面には shear lip が認められるようになる。なお 400℃ 以上では破断面は酸化するので幾分観察しにくくなる。加熱後室温で試験した破断面は低温加熱の場合とほぼ同様である。

写真 1 に見られるように, いずれの破断面でも, クラックの発生場所が確認できる。また室温および低温ではクラックが放射状 (スポーク状) に進行した様子が明瞭に認められ, 脆性破面の特徴が良く現われている。

静的曲げ試験片の破断の様子は第 11 図の (a), (b), (c) いずれかに分類できる。(a) はクラックが試験片の引張側表面から垂直に発生し, そのまま直進して破断した場合で, 室温試験にのみ見られる。(b) は試験片引張側表面からクラックが発生し直進するが, 中立面で二方向に分かれて T 型破断を示した場合で, 100~400℃ の温間試験に多く見られ



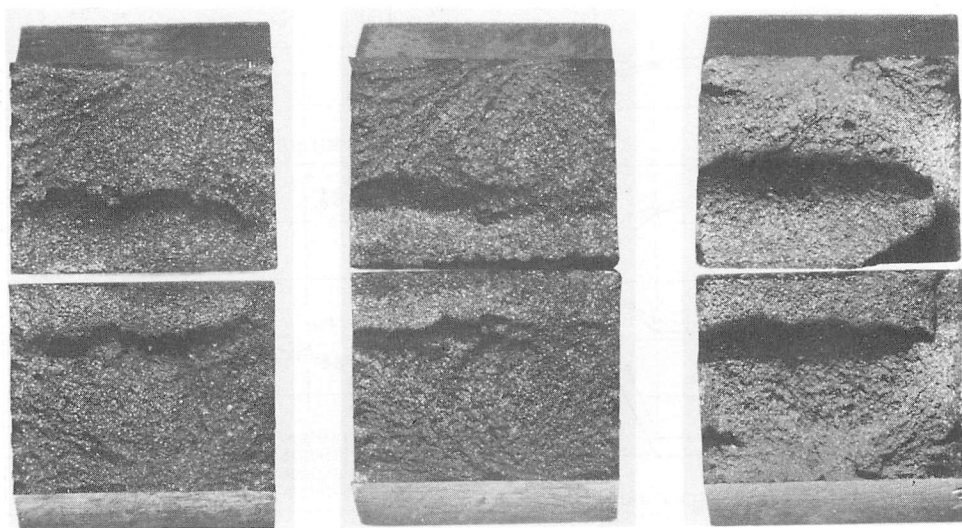
第 10 図 焼戻しパラメーターと機械的性質の関係



室 温

100℃

200℃



400℃

500℃

600℃

写真1 衝撃試験片の破面

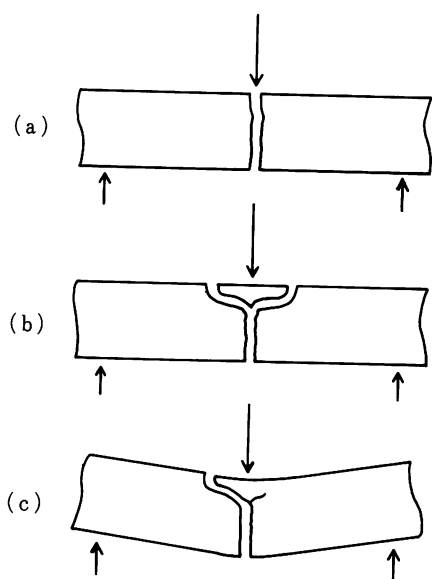


図11 曲げ試験片の破断部

る。(c)は、(b)と同様に進行したクラックが、中立面で二方向に分かれた後の伝播速度が異なったために、片寄った破断をした場合でもう一方の側にも、分かれた後のクラックがある程度進行していることが認められる場合が多い。このような破断は500～600℃温間試験に多く見られ、引張側表面および両側面に shear lip が認められる。(a), (b), (c)いずれの場合も、クラックの発生場所および放射状に進行した様子は、衝撃試験片の場合と同様である。

衝撃試験・静的曲げ試験共に試験結果にはかなりのバラツキを示した場合もあるが、その原因は一般にクラック発生時にあると云われている。クラック発生に影響する因子としては、試験片表面の平滑さ、試験片の組織等が考えられる。本鋼種では特に、組織中に存在する炭化物の大きさ、分布状態等の影響が考えられる⁷⁾。この点については、前述のクラック進行の様子をも含めて改めて検討したい。

IV 結 言

SKD 11 の温間における機械的性質について実験した結果を要約すると次の如くである。

1. 温間における機械的性質は、加熱後室温で試験した結果に比べて、硬さ・曲げ応力は僅かに低下し、靱性は向上する。その相違を室温における試験結果から類推することは困難である。

2. 550℃以下の温間における機械的性質の変化は、加熱による焼戻しの影響よりも数百度に加熱されること自体による影響が大きく、600℃では焼戻しの影響の方が大きい。

3. 加熱の影響は極めて短時間に現われ、加熱時間の長さの影響は少ない。

4. 加熱温度の変化に伴う衝撃値と静的曲げ仕事量の変化はかなり異なった傾向を示す。

5. 温間においては硬さはやや低下するが、550℃以下では工具材料として必要な硬さは維持し、かつ曲げ応力・靱性はむしろ向上するので、この温度範囲では工具材料として良好であると考えられる。しかし、工具材料としての使用条件を考慮すれば、さらに圧縮強度・耐磨耗性等についての検討も必要である。

本実験を行なうにあたり御助言を頂いた、本校機械工学科大島教授、硬さ測定に御助力頂いた北海道大学工学部金属工学科渡辺教授ならびに福地助手、実験装置の製作に御協力頂いた本校機械工学科実習工場の各位、および、実験の一部に協力された本校機械工学科材料力学実験室卒研生の諸氏に深く感謝する。

文 献

- 1) 杉山, 山本, 鮎谷, 古沢: 鉄と鋼 60 (1974) 85
- 2) 西村: 日特技報 8 (1972) 1
- 3) 新持, 浦野: 塑性と加工 12 (1971) 229
- 4) 森本: 鉄と鋼 57 (1971) 116
- 5) 西村: 日特技報 10 (1975) 51
- 6) 沢, 西村, 山内: 日特技報 10 (1975) 71
- 7) 岡林, 富田, 山口: 鉄と鋼 63 (1977) 98
- 8) 沢, 西村, 山内: 日特技報 11 (1976) 20
- 9) 田村, 富田: 塑性と加工 18 (1977) 28
- 10) 高石, 前田: 塑性と加工 21 (1980) 430
- 11) 湯浅: 塑性と加工 14 (1973) 32
- 12) 山本: 塑性と加工 17 (1976) 659
- 13) 益田, 大橋: 塑性と加工 17 (1976) 738

(昭和 55 年 11 月 28 日受理)。

