

終りに本平炉の建設および操業に終始懇切なる御指導を載いた小田所長に敬意を表すると同時に設計面にて種々協力された MAERZ OFENBAN A. G. および品川白煉瓦(株)の諸氏に感謝する。(昭和36年8月寄稿)

## 文 献

- 1) C. H. POTTGIEZER: Stahl u. Eisen, 80 (1960), 27, October
- 2) E. C. SORRELES: Proc. Open-Hearth, 63 (1954), 000

## 鋼の高温における引張諸性質の変形速度依存性\*

(鉄鋼材料の高速衝撃引張試験に関する研究—II)

作井誠太\*\*・中村正久\*\*\*・布村成具\*\*

## Influence of Deformation Rate on the Tensile Impact Properties of Steels at Elevated Temperatures.

(Study on the impact tensile properties of steel—II)

Seita SAKUI Tadahisa NAKAMURA and Shigetomo NUNOMURA

## Synopsis:

This paper describes of the influences of deformation rate of wide range on the tensile impact properties of several steels by using a high-speed impact-tensile testing machine with a large rotary disk. The deformation rate was varied from static region to 80m/s, and the testing temperature from room temperature to 800°C. The results obtained were summarized as follows:

(1) Blue brittleness was observed clearly in mild steel and two alloy steels, and temperature range of blue brittleness shifted to higher temperature with increasing rate of deformation. This shift was conspicuous up to a speed of deformation of 10m/s, but was decreased beyond this speed. Moreover, at the speed of 40 m/s the blue brittleness temperature was decreased on the contrary.

(2) The similar dependence on deformation rate was also made clear, with regard to the brittleness of 18-8 stainless steel which was due to the effect similar to that causing blue brittleness as well as the brittleness of pure copper at elevated temperature.

(3) At higher temperature over 600°C, the critical impact velocity was not observed so distinctly as obtained at room temperature. Tensile strength was lowered with a larger scattering as the deformation rate was increased, while, correspondingly, the value of elongation or reduction of area showed tendency to be rather larger. This phenomenon, named by the authors as "high-rate deformation softening", was discussed in relation to the load-time curves observed experimentally.

## I. 緒 言

多くの工業材料は高温において使用されもしくは変形加工される。使用状態における材料の特性としてはクリープまたは疲労が主として問題にされるが、衝撃荷重が重要視される場合も少なくない。特に変形加工に注目すれば、近代の金属加工設備はいずれも高速化されほとんどの場合  $10 \sim 10^2/s$  程度の加工速度となつている。さらに最近問題とされている高エネルギー高速度加工法に

いたつては、材料は非常に高速で加工される。かかる高い変形速度、すなわち衝撃変形の下での材料の挙動に関しては、多くの興味を持たれ今日までかなりの研究が行なわれてきた。しかし衝撃荷重を得ることが容易でないこと、および荷重の測定にやや特殊の技術を要することなどの理由で、研究は主として常温におけるものに限ら

\* 昭和 36 年 4 月本会講演大会にて発表

\*\* 東京工業大学 工博

\*\*\* 東京工業大学

れ、高温または低温における研究にいたっては、A. NADAI および M. MANJOINE<sup>1)</sup>らの研究以外、ほとんど見るべきものなく、未だ十分とはいえない。本報告は以上の観点から著者らが先に報告<sup>2)</sup>した大型の回転円板を用いた高速衝撃引張試験機を用いて主として鋼の高温における引張諸性質の変形速度に対する一般的变化を求めため構造用鋼、18-8 ステンレス鋼およびそれらと比較するために用いた市販純銅について行なつた実験のうち、主として 800°C までの実験温度の結果について述べる。この温度範囲は熱間加工温度範囲より低いが、材料を使用する立場からは重要な温度範囲と考えられる。

## II. 実験方法および実験条件

### i) 実験試料

実験に用いた試料は Table 1 に示す。4種の鋼は軟鋼、構造用特殊鋼として 1Cr-0.3Mo 鋼、2<sup>1</sup>/<sub>4</sub>Cr-1Mo 鋼および高温強度の高い材料としての18-8ステンレス鋼である。これらの試料はいずれも熱間圧延または鍛造により作られた 20~25mm φ の材料を受入のまま使用し試験片を作成した。ただし 18-8 ステンレス鋼のみは溶体化処理したものである。比較のために用いた非鉄金属試料は銅であつて市販純度の冷間引抜材である。試験片の形状は Fig. 1 に示す。

### ii) 試験速度

実験は試験温度および試験速度に対する引張諸性質の変化を求めることが目的であるが、そのうち衝撃速度はつぎのように選んだ。一般的には静的試験 (10<sup>-6</sup>m/s) ならびに 2.5, 10 および 40 m/s の衝撃速度、詳細な実験においては静的、1, 2.5, 5, 10, 20, 40 および 80 m/s の衝撃速度における測定を行なつた。各測定点は

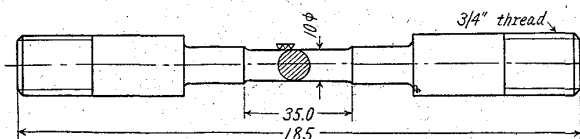


Fig. 1. Shape and size (in mm) of the test piece.

2個ないし 20 個の試験片について実験し前報<sup>2)</sup>における測定精度内において再現性があることを確認した。なお静的試験は油圧式万能試験機 (容量 35 t) を適当な容量 (3 t または 10 t) で使用した。

### iii) 試験片の加熱方法

試験片の加熱はつぎのような理由から 10 kw, 500 kc/s の高周波発振器により誘導加熱を行なつた。

(イ) 高温まで極く短時間に、しかもいかなる高温での加熱も容易にできる。

(ロ) 加熱体の容積を非常に小さくすることができるから、衝撃端 (すなわち試験機円板の爪) に十分近かつけて設けることができる。

試験片と加熱コイルおよびロード・セルの関係を Fig. 2 (a) に示す。高周波加熱は図のごとく試験片の一部を加熱するうえ、ロード・セルにはこれの保護のため冷却を行なつているため試験片の軸方向に温度勾配が生ずる。さらに高周波加熱は表皮加熱であるため試験片の断面についても温度勾配がまぬかれない。このため加熱は断続的に行なつた。温度調節器の設定温度と実際の指示温度との差を利用し、比例動作、積分動作を行なつて保温する様子は同じく Fig. 2 (b) に示した。試料 S7 の試験片を用い試験片の軸方向および中心部に合計 8 個の熱電対を溶接して加熱温度の分布をあらかじめ測定した

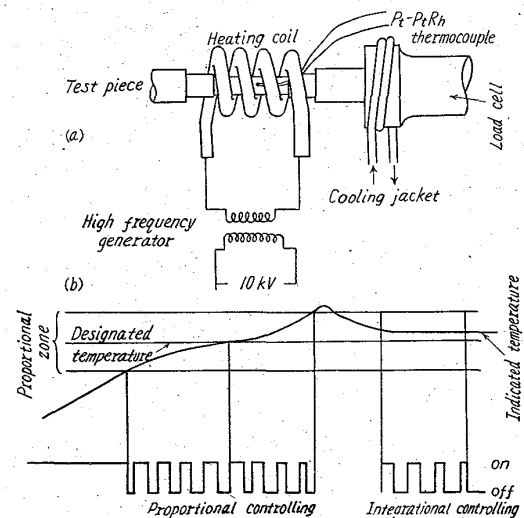


Fig. 2. Heating system of the test piece.

Table 1. Chemical composition of specimens (in wt. %).

No.	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Remarks
S 4	0.20	0.20	0.47	0.027	0.015	—	1.00	0.26	1Cr-0.3Mo
S 5	0.15	0.34	0.49	0.019	0.013	—	2.33	0.90	2 <sup>1</sup> / <sub>4</sub> Cr-1Mo
S 6	0.15	0.21	0.44	0.013	0.019	—	—	—	Mild steel
S 7	0.07	0.76	1.03	0.030	0.006	9.00	18.54	—	18-8
Cu 3	Cu > 99.8								Pure copper

が、それらの指示温度が試験片中央表面の温度に対し常に  $\pm 5^{\circ}\text{C}$  以内にあるような加熱条件を見出して実験した。Fig. 1 に示した試験片の形状はかかる予備実験のうち決定したものである。すなわち試験片中央部の両端のやや太くなった肩の部分は高周波加熱の能率がよくなり上に述べたとき温度の分布状態が得られるように寸法を決定した。

実際の実験においては熱電対は試験片表面中央部にアスベスト紐でしばりつけてあり、試験片の平行部は全部アスベストにて巻きあげ保温の向上と酸化防止を兼ねさせた。なおいずれの場合も試験温度に 10 分間保持後試験を行なった。

### III. 実験結果および考察

実験は前報<sup>2)</sup>において述べた方法により、すべての場合荷重-時間曲線を記録し、荷重-時間曲線から求めた見掛けの引張強さ(高温においては当然酸化層の影響があるが、それを考慮に入れて計算した値もそれほど大なる相異は認められなかつたので最初の断面積で除した値を以て引張強さとした)、伸びおよび絞りを求めた。

#### i) 荷重-時間曲線

Photo. 1 にこの実験で得られた荷重-時間曲線の代表例を示す。写真には Table 1 にしたがった試料番号、試験条件および試験結果が示してある。S 6 (軟鋼) は

フェライト鋼の代表として、S 7 はオーステナイト鋼の代表として示した。軟鋼は約  $300^{\circ}\text{C}$  までは降伏点の存在と靭脆性によつて、それにロード・セルの振動が加わつて降伏点以後非常に多い振動を含んでいる。またこのことは高速の試験においてさらに著しくなる。しかし軟鋼といえども  $300^{\circ}\text{C}$  以上の試験温度になれば次第にこの振動が緩和される。また特に高温・高速の試験においては後に示すごとく曲線が特色ある形状を示すようになる。これに反しオーステナイト鋼である S 7 はこの範囲の実験では非常に滑らかな曲線をなしており、また高温においても曲線の形状に変化は見られない。

また鉄鋼と比較するため市販純銅 (Cu 3) の結果をも示した。銅は焼鈍状態では臨界衝撃速度が非常に高くなる。それはわれわれの試験機の衝撃速度においても測定が困難になることをおそれ冷間加工材(加工度不明)を用いた。前報において述べたとき、弾性限における応力歪曲線の勾配の急激な変化に伴う、塑性波伝播速度の相異に基づく降伏点類似の曲線が現れることおよび、冷間加工材の

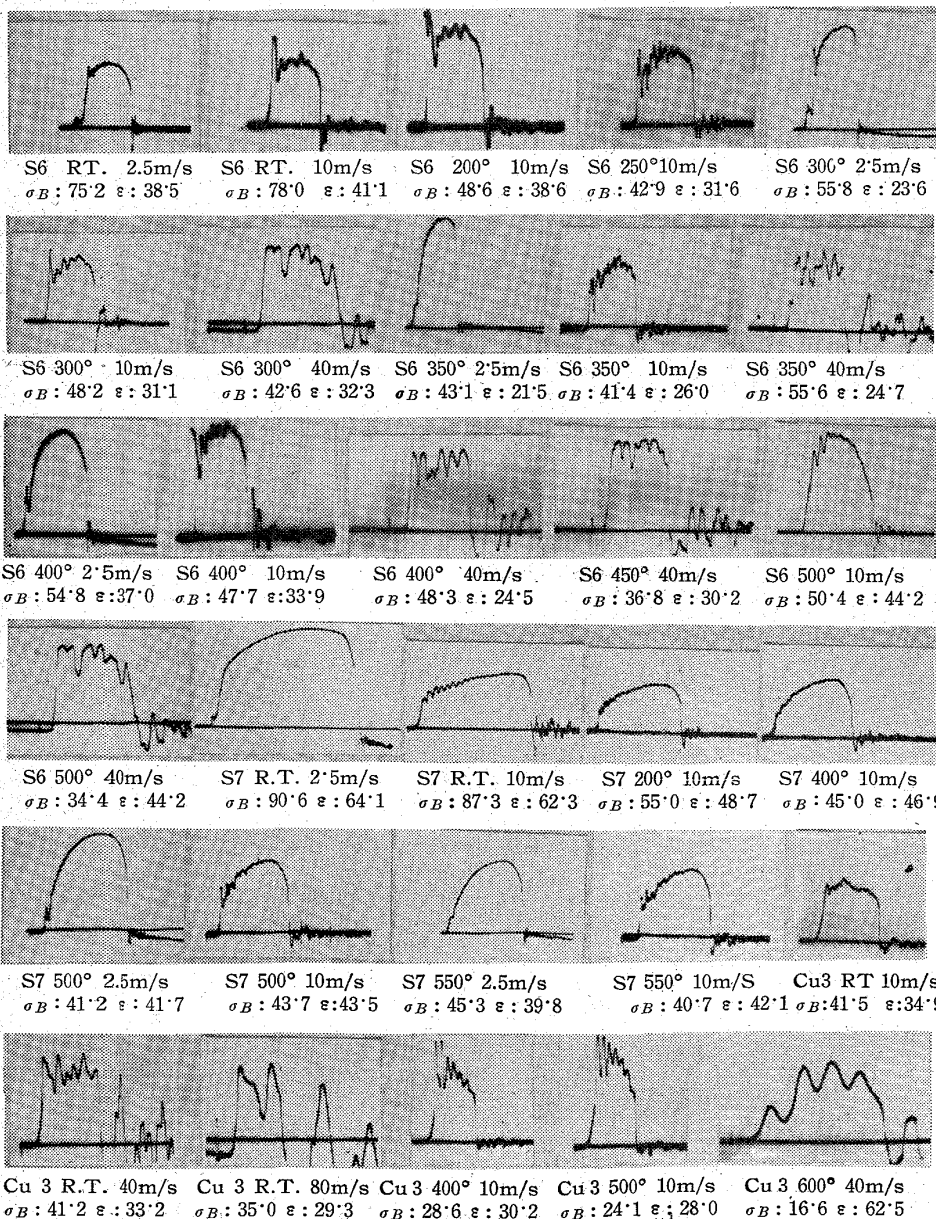


Photo. 1. Examples of load-time traces at various designated test conditions. Illustration: R.T.=room temperature, m/s=impact velocity,  $\sigma_B$ =tensile strength in  $\text{kg}/\text{mm}^2$ , and  $\epsilon$ =elongation in %.

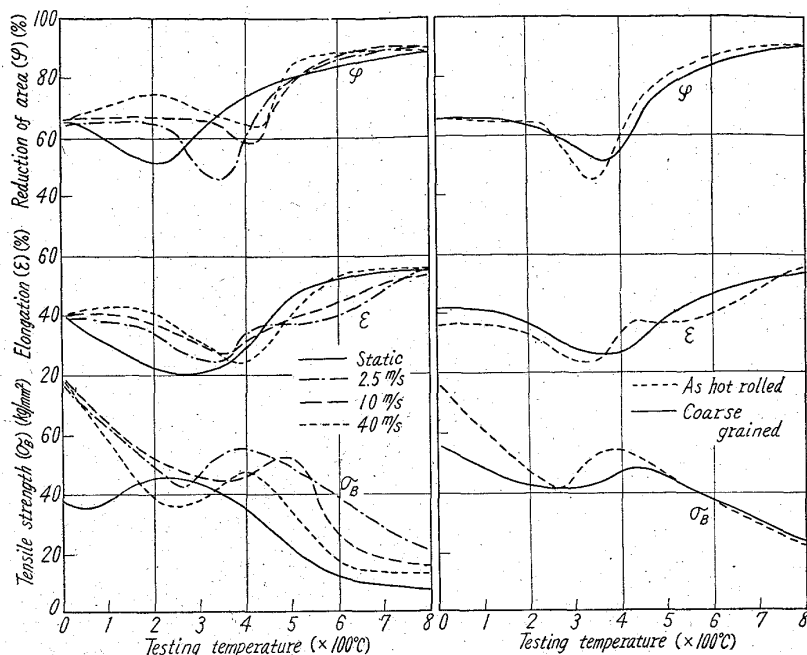


Fig. 3. Variation of tensile properties of mild steel (S-6) at elevated temperatures under the deformation speeds: static, 2.5, 10 and 40 m/s.

Fig. 4. Variation of tensile properties of mild steel (S-6) at elevated temperatures under deformation speed of 2.5 m/s. Effect of grain size of the specimen.

る。伸びおよび絞りは大體同様の傾向を示し、およそ引張速度の順に極小温度が次第に高温側に移動するが、10 m/s および 40 m/s の引張速度ではこの移動は小さい。また極小値への低下量は引張速度が大なるほど小である。以上は A. NADAI および M. MANJOINE の結果<sup>1)</sup> とほぼ一致するが、本実験の最大引張速度 (40 m/s) の場合のみが異常であつて、それはとくに引張強さにおいて著しい。これは衝撃速度が大となつたときの試験片の温度の上昇が著しいと仮定すれば一応解釈できる。また引張強さの極大と伸びおよび絞りが極小になる温度が一致しないことなどは青熱脆性の実験結果ではしばしば認められることである<sup>2)</sup>。

軟鋼の青熱脆性におよぼす結晶粒度の影響を調べるために S6 を 1300°C で 2h 焼鈍し炉冷した試料 (S6-A) の引張速度 2.5 m/s の実験結果を S6 の同一条件の結果と比較したものを Fig. 4 に示す。結晶粒度は ASTM 粒度番号で

ため比較的振動を多く含んだ形状となつていて、軟鋼にやや類似した曲線が得られた。

ii) 青熱脆性

低炭素キルド鋼 S6 の試験温度：常温～800°C における引張速度：静的、2.5, 10 および 40 m/s の実験結果を Fig. 3 に示す。

静的試験の結果 (図中実線) では引張強さは約 250°C に極大が、伸びおよび絞りは約 200～250°C に極小がある。これはよく知られている軟鋼の青熱脆性の現象である。同図は引張速度の増大にしたがつてこの脆性が現れる温度が次第に上昇する有様を示している。すなわち、引張強さの極大点は、引張速度 2.5 m/s では約 400°C、10 m/s では約 500°C となつておりさらに引張速度が大となり 40 m/s の場合は 400°C とかえつて低下している。また、引張強さの極大値は静的 2.5 m/s は引張速度の上昇とともに増加し、それは 10 m/s まではあまり変化はなく、40 m/s では著しく低下してい

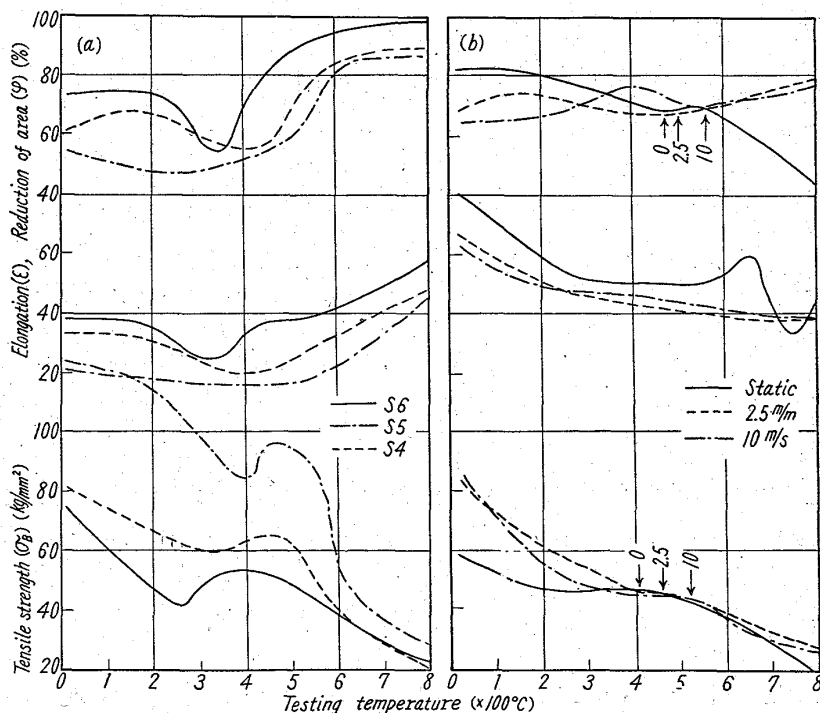


Fig. 5. Variation of tensile properties of the 3 kinds of structural steels under the deformation speed of 2.5 m/s (a), and that of 18-8 stainless steel under the deformation speed of static, 2.5 and 10 m/s (b) at elevated temperature.

S6は7.5 また S6-A は2.5 である。青熱脆性の程度を引張強さの上昇の割合もしくは伸びおよび絞りの減少の割合を以て見れば、結晶粒の粗大化によつて青熱脆性の程度は幾分減少した結果になっているが、脆化温度はやや高温側に移動している。

次に構造用鋼の種類による高温の引張諸性質の変化を Table 1 に示した3種類の構造用鋼について引張速度 2.5 m/s において調べた結果を Fig. 5(a) に示す。フェライト組織を有する S6, S5 および S4 は程度の差こそあれいずれも引張強さにおいては 400~500°C に極大があり、伸びおよび絞りにおいては 350~450°C に極小があつて青熱脆性が明瞭に存在する。しかし合金元素を含む鋼の青熱脆性は高温側にあるのが特長である。

Fig. 5(b) に 18-8 ステンレス鋼である S7 の常温~800°C における静的および変形速度 2.5 および 10 m/s の衝撃引張試験結果を示す。この鋼は高温において溶質原子の析出に伴なう脆化が存在することが知られている<sup>4)</sup>。静的試験の結果はこの脆化温度が引張強さにおいては約 400°C に、伸びおよび絞りにおいてはそれよりやや高温側において現われる。(図中の矢印)この脆化も青熱脆化とその原因が類似しているため、変形速度を大とすればその出現温度が上昇する。しかしこの場合は、絞りは引張強さとよく対応した変化を示すが、伸びはあまり変化がない。またいずれの値の変化もフェライト型の鋼に比し著しく小であり、18-8 ステンレス鋼の析出による脆化の程度は大きいものではない。

つぎに以上のべた脆性と類似した現象はまた非鉄金属においても認められる<sup>5)</sup>。いま一例として Fig. 6 に常温~800°C における市販一般用純銅の、引張速度・静的、2.5 m/s, 10 m/s および 40 m/s の試験結果を示す。用いた試料は冷間加工材(加工度不明)である。引張強さの温度に対する変化においても幾らか増加が認められ曲線は上方に膨んだ形をしている。伸びは 400~550°C までは減少の傾向にある。ここで最も特長あるのは絞りの変化である。すなわち、静的試験の結果(図中実線)は約 400°C に絞りの顕著な極小がある。この極小は引張速度の増加とともに高温側(約 600~650°C)に順次上昇することが明瞭に認められる。この場合も脆化の絶対値は静的試験の場合が最も大である。純銅における以上の脆性は、前の鉄鋼の青熱脆性およびそれに類似せる現象とは異なり、再結晶に関連するものであろう。しかし、いずれも引張試験中に生じる事柄で時間依存度の高い現象であるから、同様な変形速度依存性が存在する。

以上を通じて、一般構造用鋼においては青熱脆性が顕

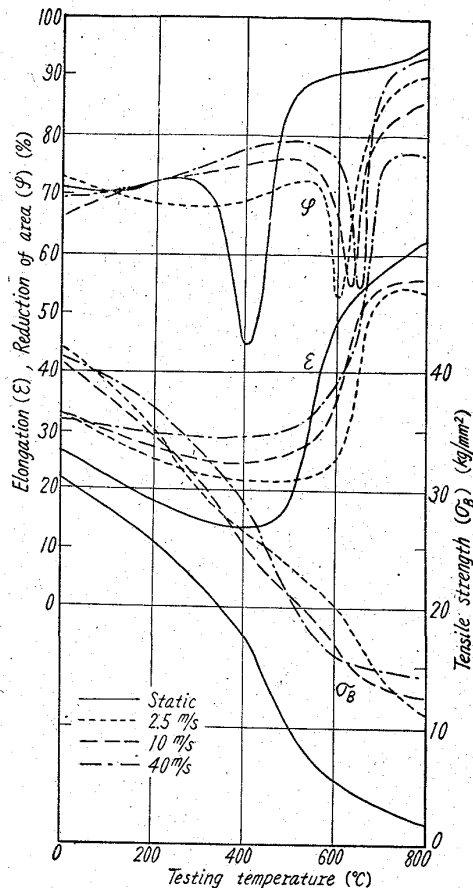


Fig. 6. Variation of tensile properties of commercial pure copper at elevated temperature under the deformation speeds of static, 2.5, 10 and 40 m/s.

著であり、この脆性に対する変形速度の影響を明らかにした。変形速度の増加による脆化温度の高温側への移動は古くはシャルピー衝撃試験による研究により、また前に述べたごとく NADAI らの結果と同様であるが、さらに変形速度が大となれば試験片の発熱が大となり軟化の影響を受け、脆性はかえつて減少しかつ低温側で生ずるようになることについて述べた。またこの脆性と類似した現象である 18-8 ステンレス鋼の溶質原子析出に伴なう強度の増加および銅の再結晶に際しての脆性にも同様な変形速度依存性が存在することなどについて比較検討した。

### iii) 変形抵抗および延性に対する変形速度の影響

鋼の高温強度は青熱脆性または再結晶等の影響が重複している温度範囲においては現象が複雑であり変形抵抗あるいは延性に対する変形速度の影響を知ることは困難である。したがつてこの項では、かかる領域の外側と考えられる常温および 600°C における変形速度の影響について調べた結果について述べる。

Fig. 7 は常温における変形速度に対する引張諸性質の



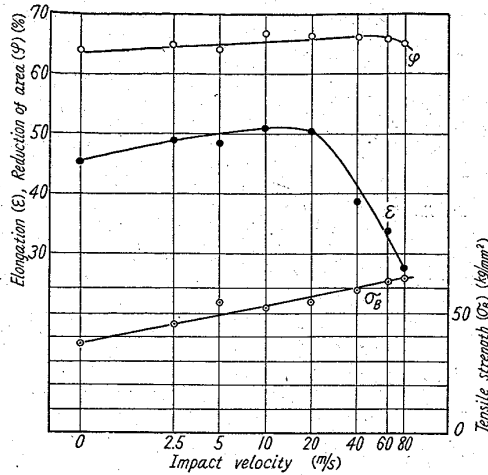


Fig. 7. Tensile impact properties of mild steel at room temperature under various impact velocities.

変化を示す。軟鋼の常温における衝撃引張試験結果はすでに前報<sup>2)</sup>においても述べたが、ここでは S 6 について示した。結果は前報とまったく同様であつて、絞りは全変形速度を通じほとんど変化はなく変形能に大なる変化はないと考えられる。伸びは変形速度 20 m/s までは増加し、20~40 m/s 間で急激に低下し、この範囲にこの鋼の臨界衝撃速度が存在する。さらに引張強さは変形速度の増加に従い次第に増加するが前報で述べたごとく 80 m/s 以上の引張速度ではこの増加は停止するものと考えられる。

次に 600°C の同様の結果を Fig. 8 に示す。絞りは変形速度の増加に対しやや増加の傾向にあり変形能の増加がわずかながらうかがわれ、また伸びもほぼ同様の变化を示す。この実験における静的試験の結果から臨界衝撃速度を計算すれば、それは本実験の衝撃速度の範囲にあるにもかかわらず、常温の実験のごとく特定の衝撃速度における伸びの明瞭な低下は認められず、従つて臨界衝撃速度は求まらなかった。従つて臨界衝撃速度は正確には破断試験片の伸び分布を測定して求めなくてはならない。

ここで最も特異な変化を示すものは引張強さである。すなわち変形速度 5~20 m/s の範囲において不連続な低下が存在することである。この範囲における実験は測定上の誤差を懸念して多数の実験を繰返して行なつたが結果は図に示すごとく測定値の著しい散乱を示す。この現

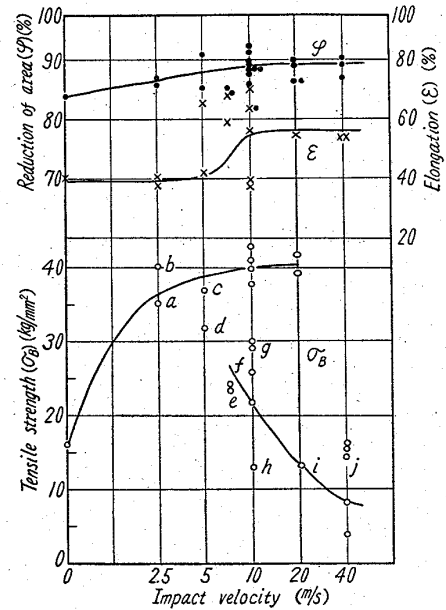


Fig. 8. Effect of speed on the impact tensile properties of mild steel at 600°C. (a~j are described by load-time relationships in Photo. 3).

象をわれわれは一応高速軟化と呼ぶことにする。高速軟化はこの実験に用いたいろいろの構造用鋼において認められた。S 6 のかかる実験の場合に得られた荷重-時間曲線の例を Photo. 2 に示す。記号 a~j は Fig. 8 のそれぞれ同記号で表わされた各点の実験条件を示す。高速軟化を示す点の荷重-時間曲線はいずれも曲線の頭部が扁平に切断されたとき形状を有している。かかる写真と Photo. 1 のこれより低温の高速の試験における写真を比較して見るとき著しい特長があることがわかる。高速軟化は材料の性質上の事柄であるのか、または応力波伝播上の問題であるかはこの結果のみからは断定できないが、一方高速軟化を示す試験片は、伸びおよび絞

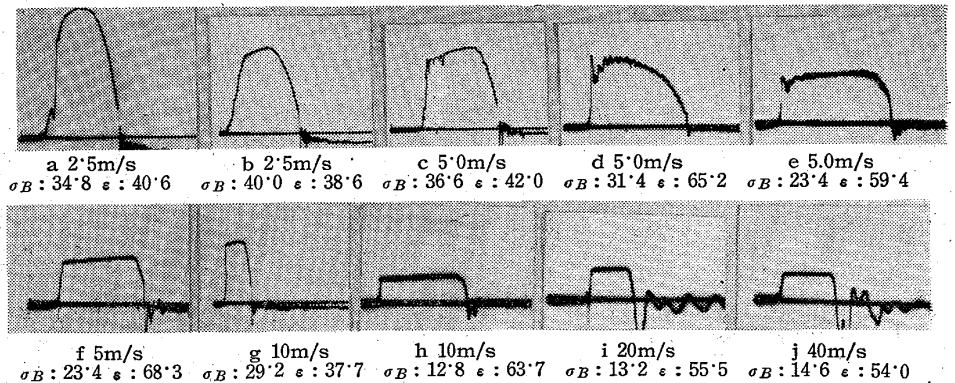


Photo. 2. Examples of load-time photographs of tensile impact test at 600°C. Steel 6 in Table 1. Impact velocity represented in m/s, tensile strength  $\sigma_B$  in kg/mm<sup>2</sup>, and elongation  $\epsilon$  in %. a~j correspond to Fig. 9.

において多少の増加が認められ、わずかながら加工性の増加があると思われるから、鋼の熱間加工と密接な関係を有しているものと考えられる。この問題に関してはさらに顕微鏡組織の観察と合わせ、さらに広い範囲の実験結果について次報に詳しく検討する。

#### IV. 結 言

回転円板を用いた高速衝撃引張試験機により、鋼の高温における引張諸性質に対する変形速度の影響について、衝撃速度：静的～80 m/s、および試験温度：常温～800°C の範囲の実験を行ない大要次のごとく結果を得た。

- 1) 軟鋼および2種の構造用鋼には明瞭な青熱脆性が存在し、この出現温度は変形速度が大となるに従い高温側に移動するが、その上昇は10 m/sまでの変形速度において著しく、40 m/sではかえって低温になるものさえあることが認められた。
- 2) 青熱脆性と類似した原因で生ずる18-8ステンレス鋼、および銅の再結晶に伴う脆性についてもほぼ同様の変形速度依存性を明らかにした。
- 3) 高温における実験では、常温のごとく変形速度対伸び曲線の特定速度における伸びの明瞭な低下は認められず、従って臨界速度は常温の実験と同様な方法では求めることができなかつた。
- 4) 600°Cにおける引張諸性質のうち引張強さは変形速度の増加に伴って著しい値の散乱が生じて低下し、こ

れに応じて伸びおよび絞りの値はむしろ多少増加する傾向を示し延性の増加がうかがわれた。この現象を高速軟化と呼び、荷重-時間曲線から検討した。

終りにこの研究費の一部は文部省科学研究費交付金(総合研究)および日本鉄鋼協会石原研究奨励金を以て行なわれた。当局の御好意に対し深甚なる謝意を表します。研究試料の一部は日本鋼管株式会社および日本冶金工業株式会社の御配慮にあづかつた。両社に厚く御礼申し上げます。なお、実験に卒業研究として熱心に協力して下さつた角南達也(現八幡製鉄株式会社)、林忠男(現川崎製鉄株式会社)、角間孜(現本学大学院)、および須川紘(現シチズン時計株式会社)の諸君の労を多と致します。  
(昭和36年6月寄稿)

#### 文 献

- 1) A. NADAI & M. MANJOINE: J. Appl. Mech. (1941), A80  
A. NADAI & M. MANJOINE: Proc. ASTM, 40 (1940), 822  
M. MANJOINE: J. Appl. Mech., (1944), A211
- 2) 作井, 中村, 布村: 鉄と鋼, 47 (1961), 801
- 3) 例えば, 山田, 横山, 中村, 漆原: 日本金属学会誌 21 (1957), 230
- 4) 例えば Metals Handbook, (ASM) (1961) vol. 1. p. 503
- 5) 例えば Elevated-temperature Properties of Copper and Copper-Base Alloys. (ASTM STP No. 181), (1956), p. 41~43

## 構造用低合金鋼(SNCM8)の焼入性におよぼす 合金元素の効果について\*

(構造用低合金鋼の研究—I)

西原 守\*\*・中野 平\*\*・牧岡 稔\*\*\*・後藤督高\*\*

### Effects of Alloying Elements on the Hardenability of Low-Alloy Structural Steels (SNCM8).

(Study of low-alloy structural steels—I)

Mamoru NISHIHARA, Taira NAKANO, Minoru MAKIOKA and Tadataka GOTÔ

#### Synopsis:

Full investigation has never been performed with the effect of alloying elements on the hardenability and mechanical properties in a quench-and-tempered condition with commercial

\* 昭和34年11月本会講演大会にて発表 \*\* 株式会社神戸製鋼所, 中央研究所, 神戸研究部

\*\*\* 株式会社神戸製鋼所, 検査部, 高砂検査課