

## ばね鋼 (SUP 6) に及ぼす Cu の影響 (I)\*

小平俊雄\*\*・安田洋一\*\*

## INFLUENCE OF Cu ON THE SPRING STEEL (SUP 6) (I)

Toshio Kodaira, Yoichi Yasuda

## Synopsis:

The steel products of Japan have contained more Cu than the imported products due to their raw materials, and after the War II that tendency has been especially remarkable. The authors studied the effects of Cu on the silicon-manganese spring steel, systematically, with the samples industrially produced. The results of the present paper concerning the hot properties were as follows:

- 1) Cu has scarcely affected on the growth of austenite grains.
- 2) On the eye-back work in the manufacturing of the springs, the temperature of generating the cracks lowered as the Cu content increased.
- 3) In the hot-tensile test, Cu increased slightly the tensile strength and the yield point of the steel but decreased very fairly the elongation and the reduction of area.
- 4) In the hot-impact test, the increase of Cu content promoted the brittleness of the steel at high temperatures.
- 5) The resistances to the deformation measured by the drop-weight method increased slightly with Cu.

## I. 緒 言

我が国の鋼材は、鉍石その他の関係により、昔から、外国鋼材に比し Cu 含有量の高い事が特徴であつたが、戦後は鉍石の不足、スクラップ管理の不十分から逐年 Cu 量が増加し、これが鋼質におよぼす影響が問題となり、規格制定においても論議の多い所であるが、従来の研究は我国では<sup>1)2)3)4)</sup>主として普通鋼乃至低碳素鋼に対するものが多く外国の研究は<sup>5)6)</sup> Cu を合金元素と考へて機械的性質或いは耐蝕性の改善を目標としたものであつて、特殊鋼に不純物として混入してくる Cu の影響についての研究は比較的少い。

我々は特に Si-Mn 系ばね鋼 (SUP 6) において不純物として含まれる Cu が如何なる影響をあたえるかを、実験室で作られた試料でなく実際に工業的に作られた材料につき、系統的に調査する目的を以て各種の実験を企画実施した。以下第 1 報においては高温における諸性質について研究した結果を述べる。

## II. 試料の作製

試料としては SUP 6 において C, Si, Mn, P, S について同じ値と、且つ殆んど同様の製鋼履歴を持ち Cu のみ 0.2~1.0% の間に变化せしめた鋼塊を作る事を目標とした。

これがために、造塊直前の湯に Cu を漸次添加する事を試みたが、イ) インゴットケース内の添加は Cu の偏析が多く、ロ) 少量宛出鋼して、炉内添加を行う事は傾注の調節に困難があり、ハ) 結局一度取鍋に取つた湯を予め溶解した Cu の所定量を入れた小取鍋に移し十分攪拌してからインゴットケースに注入するという方法によつて所期の鋼塊を作る事に成功した。使用スクラップは中空鋼廃材 70% 普通スクラップ 30% で炉は塩基性 7 t 弧光炉で、2 回除滓による当社の標準溶解法で溶解した。インゴットは 230 kg、上注、丸型である。

化学成分は Table 1 の通りであるが、Cu についてはインゴットの上部および下部より試料を採取して偏析を調査したが、相違を認めなかつた。唯後で圧延加工を行つたものについて再調査した所、試料 No. 10 のみ拡散が十分でなかつたためか、インゴット分析値に比し、0.1~0.2% 高い値を示したが、他の試料については著しい相違はなかつた。インゴットは表面状況を一定にするために全部皮削を行い、まず 80 mm 巾 単重 60 kg のピレット 3 本を作製し、この 2 本を 8×63.5 mm のばね用平鋼に、残り 1 本を 16 mm φ および 19 mm φ の棒鋼に圧延して以下の諸実験の供試材とした。

\* 第 43 及 45 回大会にて講演

\*\* 新理研工業株式会社

ピレット圧延の条件:

鋼塊加熱時間 4.5h, 引込温度 1120~1150°C,  
仕上温度 1010~1035°C

平鋼圧延の条件:

ピレット加熱時間 3.5h, 引込温度 980~1050°C,  
仕上温度 820~880°C

棒鋼圧延の条件:

引込温度 1025~1050°C

ピレットおよび平鋼, 棒鋼について疵見検査を行つたが, Cu の差による疵の相違は認められず, またピレットの組織においても Cu の析出等は認められなかつた。

Table 1. Chemical compositions of samples.

| C          | Si   | Mn   | P     | S     | Ni   | Cr   |      |      |      |      |
|------------|------|------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|
| 0.62       | 1.57 | 0.79 | 0.021 | 0.020 | 0.02 | 0.03 |      |      |      |      |
| Sample No. | 1    | 2    | 3     | 4     | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   |
| Cu         | 0.18 | 0.28 | 0.39  | 0.50  | 0.62 | 0.68 | 0.75 | 0.80 | 0.87 | 1.02 |

### III. 高温の諸性質

#### 1. オーステナイト結晶粒の成長

No. 1, 5および10の試料について16mmφの棒鋼から採取した長さ20mmの試片を空気浴中で800~1200°C間50°Cおきに30mn, 1hおよび2hの加熱を行い, 徐冷して初析フェライトまたは脱炭層における網状フェライトを鏡鏡したが, その結果はFig. 1の如くであり800~1050°Cの成長状況は含有するCu%によつて全く変化しないが1100~1200°Cにおいて, Cu%の高い方が, 結晶粒成長が幾分阻止される傾向にある。但しこの傾向はAl, Ti等において認められる様

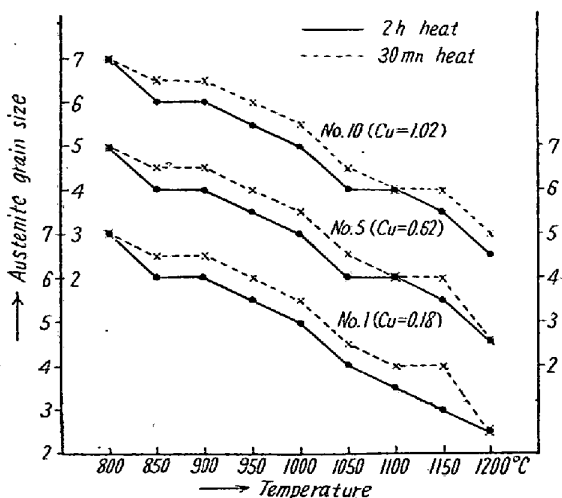


Fig. 1. Relations between Cu content and the growth of austenite grain.

な著しいものではない。

#### 2. 変態点

No. 1, 4, 7 および 10 の試料を用い 16mmφ の棒鋼から 5φ×50mm の試験片を作り, 手製の熱膨脹計を用いて  $Ac_1$ ,  $Ac_3$ ,  $Ar_3$ ,  $Ar_1$  を測定した。加熱および冷却速度は略々 10°C/mn に保つた。Cu の変態点におよぼす影響については多くの人の測定があるが何れも  $A_3$  および  $A_1$  点を降下させるとされている。我々の測定もバラッキはあるが Cu 1% あたり約 10°C 程度変態点を降下させる傾向を認める事ができ Rädiker<sup>1)</sup> 等の値と一致している。

#### 3. 熱間目玉捲加工試験

鋼材の熱間加工性におよぼす Cu の影響については Nehf<sup>2)</sup>, Lorig および McLaren, 小平および児玉氏等の多くの研究があり, Cu が数% も含まれる場合には所謂赤熱脆性を示し, Cu 0.20% 程度でも 1100°C 以上の温度で鍛造や圧延を行つた場合には, 縁或いは全面にわたつて亀裂の入る事が知られている。このクラックの原因は, 鍛造や圧延の加熱で, スケールが生成する際 Fe が選択的に酸化されるため, スケールの下に濃縮された Cu が粒界に浸透して生ずるとされ, これが防止には Ni や Co, 特に Cu 量の 1/2 の Ni が有効であり SUP 6 の如き高 Si, 高 Mn は有効でないといわれている。ばね鋼では, 板ばね成型時に一番リーフの熱間目玉捲加工 (Eye Back Work) が最も severe な熱間加工であり, かつこの際に表面疵ができる事はばね製造において大きな問題となるので, 試料の平鋼を用いて実際の目玉捲加工試験を行い加熱温度とヒビ割れ状況の関係を調査した。

材料の先端 200mm を重油焚加熱炉にて 4~8mn 加熱して所定の温度になし, Eye Back Machine を用いて 10~15 秒間にて内径 29mm の目玉に仕上げた。加熱温度は 900~1200°C を 50°C おきに取り, 試料下面に密着させた熱電対で測定し, (但し 1200°C の場合は光温計を併用した) 仕上温度は輻射高温計にて, 加熱温度と同一ヶ所を測定したが加熱温度より平均約 250°C 低下した。その結果は Fig. 2 に示す。図中の×印はヒビ割れの著しいもの, △印は明瞭にヒビ割れを認め得るもの, △印はこれより程度の軽いもの, ●印はかすかにヒビ割れの認められるもの, ○印は異常なきものである。Fig. 3 の左側はその外観写真であり, 右側はその断面の顕微鏡写真である。

Fig. 2 の結果によれば, 加熱温度 1050°C 以下ではヒビ割れは殆んど起らないが, 1100°C では Cu 0.62%

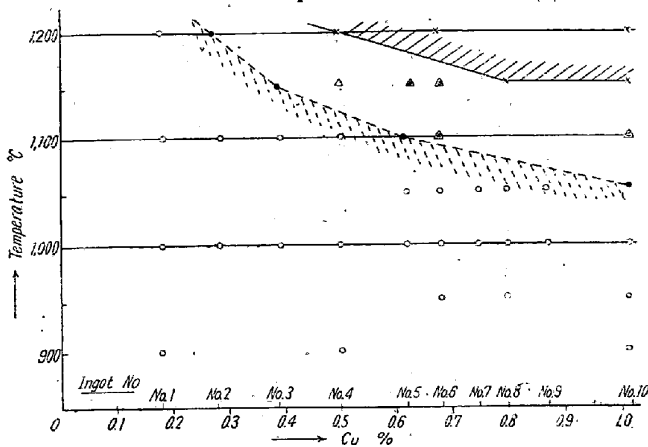


Fig. 2. Cracks on the eye-back parts of spring influenced by Cu content and working temperature.

| Symbol in Fig. 2 | Outer appearances     | Microphotographs of section |
|------------------|-----------------------|-----------------------------|
| ×                | Heavy cracks          |                             |
| △                | Clear cracks          |                             |
| △                | Better than the above |                             |
| ●                | Slight cracks         | Photo: absent               |
| ○                | No cracks             | Photo: absent               |

Fig. 3. Outer and sectional appearances of eye-back parts.

より、1150°Cでは0.39%より割れがあらわれCuの増加と共にその程度が激しくなる。1200°Cでは0.28%であらわれ急進的に悪化し、Cuによる熱間加工性の低下が明瞭にあらわれている。即ちCuの目玉捲加工におよぼす害は加工温度の上昇すると共に表面クラックを生ずる事であるが、加熱温度を1150°C以下に抑えるならば現行規格であるCu≤0.35%では顕著なヒビ割れを生ずる事はない。

4. 熱間引張試験

4-1. No. 6を除く9鋼種について100°Cより900°Cまで100°Cおきの他変態点に近い750°Cを加えた合計10ヶ所の温度で引張試験を行った。全部の試験を10tのアムスラー万能試験機で行ったので、温度による抗張力の変化に応じFig. 4およびTable 2の如き試験片を850°C焼準浴の16φの棒鋼から作成し、これをチャックに取付けた儘長さ240mm 0.8KWのニクロム線管状炉にて夫々の温度に15分間保持して引張った。測温は炉の胴部を貫通した熱電対の端を試験片に接触せしめて行つたが、別に測定した管状炉の温度分布はFig. 5の通りである。なお熱間引張試験では引張の速度が成績に影響するので試験機のパルプの開度によつて調節しベットの移動速度を8mm/mnに保つて行つた。

Table 2. Sizes of test pieces of hot tensile tests.

| Testing temperature | D     | d     | P      | L      | L'    | Gage length |
|---------------------|-------|-------|--------|--------|-------|-------------|
| 900~600°C           | mm 16 | mm 14 | mm 120 | mm 100 | mm 25 | mm 50       |
| 500~400°C           | 16    | 10    | 100    | 72     | 18    | 36          |
| 300~100°C           | 16    | 8     | 85     | 56.8   | 14.2  | 28.4        |

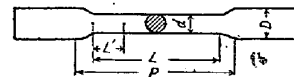


Fig. 4. Test pieces of hot tensile test

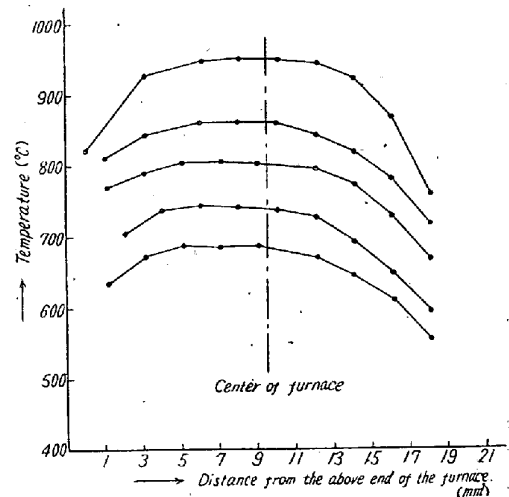


Fig. 5. Temperature distribution in the furnace for hot tensile test.

4-2. 試験成績の内1,3,5,8および10についての抗張力、伸、絞をFig. 6に示しました。400~900°Cにおける試験片の切断状況をFig. 7(写真)に示した。この試験成績についての考察は次の如くである。

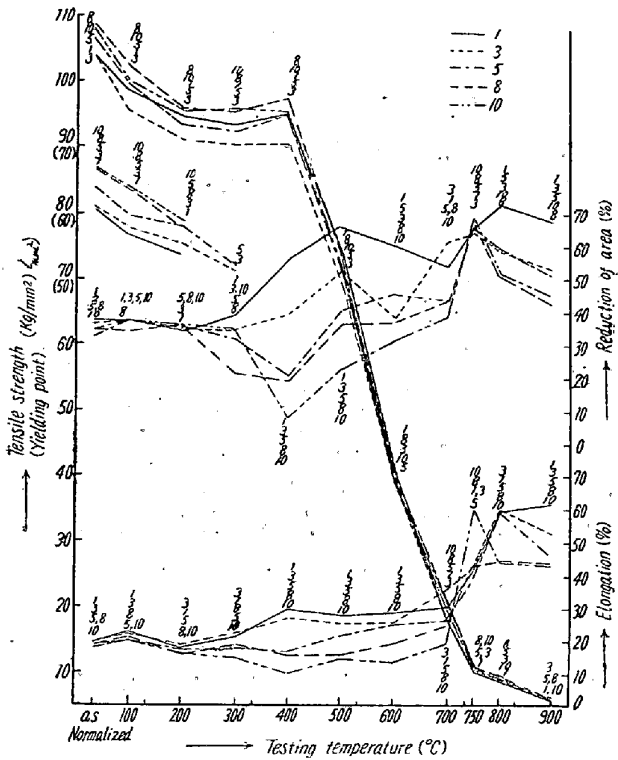


Fig. 6. Results of hot tensile tests.

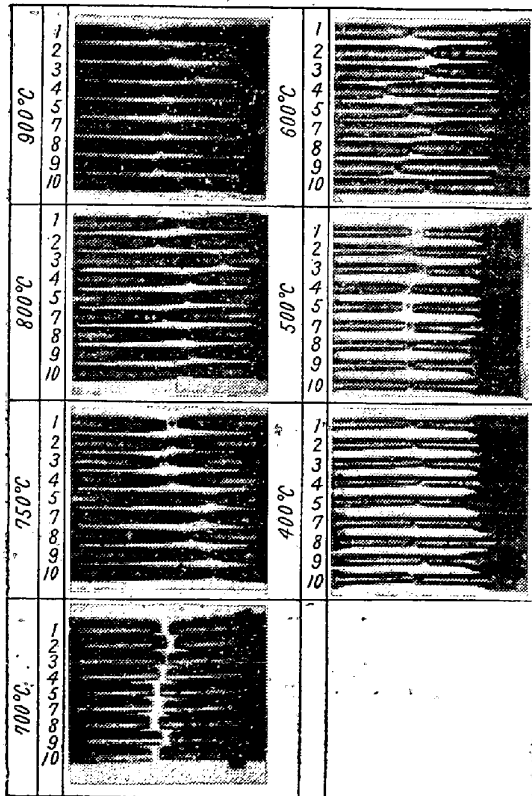


Fig. 7. Broken state of hot tensile test pieces.

4-3. 抗張力は常温より 400°C までは緩かに小さくなり 300~400°C でやや上昇し, 400°C より 750°C までは急速に, 直線的に低下して約 10 kg/mm<sup>2</sup> となり

変態点以上では再び下り方が緩かとなつて 900°C で約 7 kg/mm<sup>2</sup> となる. 降伏点は 200°C 以下の低温部においてのみ測定されるが, 高温では認められない. 常温から 400°C までは Cu の多い程幾分強度が大きくなる傾向があるが概して抗張力においては Cu の影響は明瞭に認められない.

4-4. 伸および絞りについては常温から 200°C までは Cu の影響は殆んどなく 300~700°C では若干のパラッキはあるが Cu による靱性の低下がかなり明瞭に認められ, Cu 最低の No. 1 と最大の No. 10 を比較すれば 400°C では伸びは 63%減, 絞りは 86%減, 700°C では伸は 37%減, 絞りは 29%減となり, さらに Fig. 7 の写真を見ても, 400°C では No. 5 以下が, 500°C では No. 8 以下が塑性変形の極めて少ない破断である事が認められる. 然るに変態点に近い 750°C ではこの状況が一変し, 伸, 絞り共に急に増大するが, Cu の影響は極めて不明瞭となり, さらに 800°C および 900°C になると再び Cu の多い程伸, 絞りが小さい傾向が見られる.

4-5. なお 750°C および 800°C の場合には Fig. 8 の写真に示す如く温度の最も高い中央部よりも両端に近い部分が細く絞られてその何れかの部分で破断し, 所謂端切 (ハシギレ) の現象を呈する. これは軟鋼においても見られる現象であつて, 変態点直上の  $\gamma$  領域では変態点直下の  $\alpha$  領域における場合よりも抗張力が大きいためと考えられる. SUP 6 の変態点は略々 750°C 附近にあり, かつ先に述べた如く Cu 含有量が増大するにつれて降下する. 従つて 750°C の場合低 Cu の試料では端切があらわれていないが No. 5 以下 (Cu 0.62%以上) では端切があらわれ, 800°C の場合は全数端切を呈しかつ両収縮部の距離が 750°C の場合よりも大きくなつており, 炉内温度分布を考えあわせるならば, 変態点温度にある部分が試験片の端部に移つたためと解される. 端切を生じた場合には, 抗張力, および絞りは試験温度よりも低温の場合の値を示す筈であり, 伸びについては炉内温度分布と関連して複雑な結果となるから Fig. 6 の 700~800°C の場合はこれらの点を考慮して観察する必要がある.

4-6. 端切の現象は低温より高温側で抗張力が大きくなる様な場合即ち抗張力-温度曲線に谷を生ずる様な場合に表われる現象であるから 200~400°C における抗張力の変化は端切の出現が予想されるが果してその通りであつて, 特に高 Cu のものにおいて顕著にあらわれた. しかし端切があらわれると, 各種の値の傾向が乱れ

るので、今回は 300°C の場合試験片中央を炉の下部において引張った。従つて切断場所の温度は 300°C よりも低い筈であるが Fig 6 においては便宜上 300°C の位置に記入してある。

4-7. まだ 800°C の高 Cu のものおよび 900°C の場合の切断状況を注意すると、切断部附近には多くの輪状の割目ができているのがみられ、かつ試験片製作の際のバイト目の著しいものに多い。これは表面状況の不同によつて高温時のスケール生成に不同を生じかつスケール層の下には Cu が濃縮されるから、厚いスケールの下では機械的にもまた材質的にも切欠作用が生じて割目となつたものと考えられる。

4-8. Buchholtz および Köster 或いは Smith および Palmer 等の実験では 500°C 附近の焼戻によつて抗張力の増加を認めているので本実験でも 500°C 前後に実際硬化による抗張力の変化を期待したのであるが、実際においては析出硬化の影響は認められなかつた。

5. 熱間衝撃試験

5-1. 8×63×5 mm の圧延平鋼から 8×10×55 mm 中央に深さ 2, 巾 2, R=1 mm のノッチを付した規格外のシャルピー衝撃試験片を採用しソルトバスを用いて 700°C~1000°C 間を 50°C おきの温度に、10 分間保持し、素速く取り出して平均 5 秒以内で 30 kg-m のシャルピー衝撃試験機を用いて打撃を加えた。試験片が正規の巾でないので打撃の際には試料の下に 1 mm の厚さの合板をおいて、打撃の中心が試料の中心に一致する如く調節した。また予備試料について加熱前焼準の影響を調査したが圧延材と相違を認めなかつたので 900°C 以上の場合の試料は焼準を省略した。また試料の数は各条件共、3 本宛であつて、原則としてその中央値を採用した。

5-2. 試験の結果は Fig. 8 および Fig. 9 に示す。

試料の破断の状況は Fig. 10 の写真に示す如くであり高温では完全破断に至らないで、衝撃曲げの程度のもも含まれ、これ等を一樣に衝撃値として取扱う事は不適當であるが、得られた数字について観察すると、Fig. 9 では Cu 0.62% 迄は温度 800~850°C で最高値を示し、さらに高温では幾分下り気味となるのに対し Cu 0.68% 以上では 800°C までは Curve が急激に上昇するが後は次第にゆるやかとなる。Fig. 8 については 700°C では Cu と共に滑かなカーブを描いて衝撃値は低下する。750°C 以上でも Cu の多い程、値の低下する傾向が認められるが、試料によるバラッキが多くなりかつ温度の高くなる程 Cu の影響が薄れてくる。これ等の数字の他 Fig. 10 (写真) の打撃後の試験片の形状に

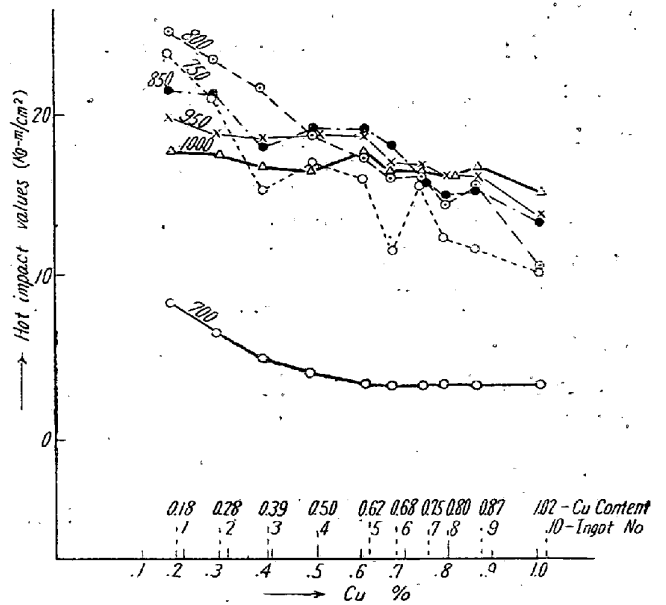


Fig. 8. Relations between the hot impact values and the Cu content at various temperatures.

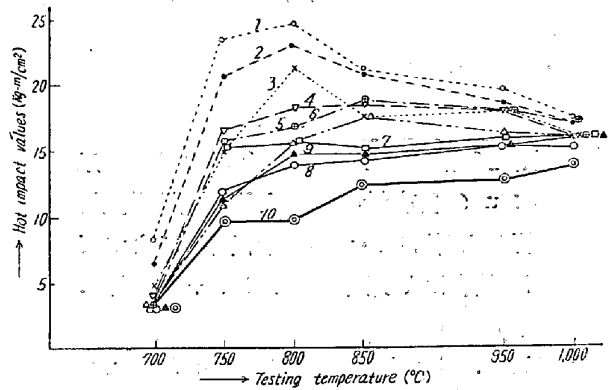


Fig. 9. Relations between the hot impact values and the testing temperature with specimens of various Cu contents.

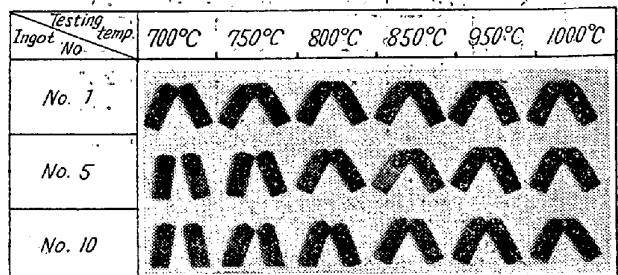


Fig. 10. Appearances of test pieces for hot impact tests after broken.

よつても Cu の増加は SUP 6 の高温脆性を助長する事が認められる。

6. 熱間変形抵抗試験

6. 1 変形抵抗の測定は落錘試験法によつた。落錘

の重量は 4.335 kg とし、これを 1.5 および 2.5m の高さから 131 kg の型材をコンクリートにて固定したアンピルの上においた試料の上に落下せしめた。アンピル対落錘の重量比は 30.5 で普通の鍛造機ではこの値は 20~25 であり、20 以上の場合にはアンピルの吸収および落錘の反撥による損失エネルギーは落下エネルギーの略々 4% 以内である事が従来の実験で確かめられており、従つて我々の実験の場合には略々無視して差支えないものと思われる。

試験片は 12φ×12mm の円柱とし試料 No. 1, No. 6 および No. 10 の 16mm φ 圧延材より採取した。試験温度は 850, 1050 および 1250°C とし空気浴にて加熱し 5 分間保持の後 2 秒以内に試験を行い、1 条件に付 4 個宛の試料を用いた。

変形抵抗  $K_{fm}$  は次式によつて求めた。

$$W = - \int_{H_1}^{H_2} V K_{fm} \frac{dH}{H} = V K_{fm} \log \frac{H_2}{H_1}$$

ここに  $W$  は圧縮に消費されたエネルギーで、上記の理由により落錘の重量×落下距離を用い、 $V$  は試験片体積で試験によつて変化しないものとし  $H_1$  および  $H_2$  は夫々試験前後における試験片の高さである。

6-2. 測定の結果の平均値を Table 3 に示したが、各温度共 Cu の含有量の増加と共に変形抵抗の増大する傾向を認める事ができる。落下高さによつて若干相違があるのは摩擦および吸収エネルギー等の無視によるものである。

Table 3. Resistances to the deformation in hot stamping

| Sam-<br>ple<br>No. | Tempe-<br>rature<br>Hei-<br>ght<br>Cu% | 850°C |       | 1050°C |       | 1250°C |       |
|--------------------|--|-------|-------|--------|-------|--------|-------|
|                    |  | 1.5 m | 2.5 m | 1.5 m  | 2.5 m | 1.5 m  | 2.5 m |
|                    |  | 1     | 0.18  | 47.7   | 32.2  | 34.3   | 22.2  |
| 6                  | 0.68                                   | 48.6  | 35.6  | 36.5   | 24.7  | 26.1   |       |
| 10                 | 1.02                                   | 50.8  | 36.7  | 37.5   | 25.0  | 29.8   |       |

先に述べた熱間衝撃試験では Fig. 8 に示す如く Cu の多い程衝撃値即ち試験片の破壊および変形に要するエネルギーが小さくなつており、加工の様式は異にするが一見変形抵抗の測定結果と矛盾する如く見える。しかし熱間衝撃試験では Fig. 10 に示す如く、大部分の試験片が破壊を起しているのに対し、落錘試験では亀裂即ち破壊には至つていない。一方熱間引張試験の結果では、Fig. 6 に示す如く 900°C 附近の抗張力は各鋼種殆んど等しいのに対して延伸率は Cu の多い程少く従つて

熱間引張における破壊のエネルギーは Cu の多い程小さいと考えられる。

此等の関係を考え合せると塑性変形に対しては Cu は若干抵抗を増加するが塑性域を小さくするので破壊に至るまでのエネルギーは小さくなると言える。熱間衝撃試験においても Fig. 9 に示す如く変形の少ない破壊をしている。700~800°C では破壊エネルギーが Cu によつて著しく低下しているが塑性変形を伴っている 850~1000°C では変形に要するエネルギーが逆に Cu によつて若干増加するので補償されて Cu による衝撃値の差が少くなつていたのである。

#### IV. 結 言

代表的ばね鋼である Si-Mn 鋼 (SUP 6) について不純物として含まれる Cu が如何なる影響をあたえるかを調査する目的を以て工業的に製造された材料において Cu を 0.18~1.02% に変化せしめまず高温における諸性質に対する影響を研究し次の結果を得た。

1) オーステナイト結晶粒の成長には殆んど影響をおよぼさない。

変態点は Cu% あたり約 10°C 低下する。

2) ばね成形時の熱間目玉捲加工試験においては Cu が増加するにつれてヒビ割れ発生の温度が低下し加工性が悪くなる。しかし加熱温度を 1150°C 以下に抑えるならば現行規格である Cu ≤ 0.35 では顕著な影響はない。

3) 熱間引張試験では抗張力、降伏点は Cu の多い程僅かに大となるが、伸、絞りは Cu が増加する程、相当大巾に低下する。但し変態点附近では Cu による変態点の変化並びに  $\alpha$  および  $\gamma$  域における抗張力の変化が錯綜して不規則な変化を示す。

4) 熱間衝撃試験においても Cu の増加は脆性を助長する事が認められる。

5) 落錘法によつて測定した熱間変形抵抗は Cu の増加に伴つて若干増大する。(昭和 30 年 3 月寄稿)

#### 文 献

- 1) 大石源治: 鉄と鋼, 12 (1926) 682 および 1036
- 2) 児玉晋匡: 製鉄所研究所報告, 8 (1928) 1
- 3) 小平 勇: " ( " ) 25
- 4) 藤原唯義, 山下伸六: 鉄と鋼, 25 (1939) 326
- 5) Lorig and Adams: Copper as an Alloying Element in Steel and Cast Iron (1948), Mc Graw-Hill Books
- 6) Gregg and Daniloff: The Alloys of Iron and Copper (1934), Mc Graw-Hill Books
- 7) Nehl: Stahl u. Eisen, 53 (1933) 773
- 8) 前田, 吉川, 太田: 鉄と鋼, 36 (1950) 151