軟鋼の温間整直加工法に関する研究*

五弓 勇雄** 岸 輝雄*** 小 椋 学****

Isao Gokyu, Teruo Kishi and Manabu Ogura : Roller Straightening of Mild Steel by Warm Working Process (Study on Warm Working 2nd Report). Straightening of steel can be attained by the warm working process, i.e., the deformation of steel in the blue-brittle temperature range. In this investigation, this process was applied to the roller straightening of 0.10% C-steel.

The results are as follows:

(1) As for annealed steel, it is found that the strength of the warm-worked steel is about 30% higher than that of the cold worked steel.

(2) The high strength of the warm worked steel is due to both the increase of work hardening and the decrease of Bauschinger's effect. The latter is especially important in straightening and is attributable to the formation of the Cottrell atmosphere of piled-up dislocations.

(3) As for 60% pre-drawn wire, it is found that the strength of the cold-worked steel decreased, but that the strength of the warm-worked steel increased. There is little work hardening at the cold working temperature, but at the warm working temperature there exists considerable work hardening. The high strength of the warm-worked steel is due to this phenomenon together with the decrease of Bauschinger's effect.

(Received September 29, 1966)

I. 緒 論

鋼をその歪速度に対応した青熱脆性温度領域で加工し、鋼材の強化をはかる温間加工法の研究は、直接的、間接的に二つの方向からなされてきている。間接的には、まず線材の加工中の温度上昇の影響を知るために、Pomp⁽¹⁾西岡⁽²⁾らによつて常温から 400°C にいたる温度範囲で引抜き実験が行なわれ、300°C 近傍で強度の上昇することが認められた。一方、鋼の変形抵抗の温度依存性を調べる実験が、Forrest⁽³⁾ Petty⁽⁴⁾ Caisso⁽⁵⁾ Baird⁽⁶⁾ 橋爪⁽⁷⁾ らによつて行なわれ、歪速度 $\dot{\epsilon}=10^{-2}$ 位で 300°C 近傍に変形抵抗のピークが存在し、これがそのまま常温強度上昇に寄与していることが確かめられている。

直接、材料の強化手段として温間加工法を用いた例としては、Nachtman⁽⁸⁾の引抜き、圧延に関する研究がある。一方、五弓、橋本⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾は、広い C-range の炭素鋼を中心に、

2, 3 の低合金鋼について温間引抜きを行ない、系統的にその特性をまとめている。これによると、冷間加工材および冷間加工後低温焼鈍した材料にくらべて、同一加工度では温間加工材は 0.2% 耐力、抗張力は上昇し、伸び絞りとは若干低下するが、同一強度の材料と比較すると、冷間加工材と変化がないと報告している。また、その強化機構については、0.02% C-steel を 4% 圧延し、硬度、電子顕微鏡観察を基礎に、加工中、フェライト内部の転位密度上昇が強化に大きく寄与していることを明らかにし、その転位密度上昇は dynamic strain aging すなわち加工中に、C, N による Cottrell Atmosphere の形成によるものであろうと結論している。

このように温間加工に関しては系統的に研究が進められてきたが、いままでは主に断面減少を伴う加工法が中心であり、材料内部に大きな歪分布を伴う曲げ、捩り加工に関しては、周藤⁽¹¹⁾の曲げによる研究があるにすぎず、とくに工業的に重要な、曲げの繰返しである整直加工については未だ実験が行なわれた例がない。よつて本実験では軟鋼線を用いて温間整直加工を行ない、焼鈍材、冷間加工材についてその特性を明らかにした。また、温間整直における強度の上昇は、温間加工時の加工硬化量と、整直においてはとくに重要なことだが加工応力方向の変化に伴う Bauschinger 効果による軟化量の 2 点に依存すると考えられる。それ故引張 - 圧縮試験を中心に、これらについての実験考察も併せ行なつた。

II. 実験装置、実験方法

引張り曲げ整直のために実験用ロールを試作した。Fig.

(11) 周藤：鉄と鋼，51(1965), No. 11, 2011.

** 東京大学工学部 冶金学教室 (Department of Metallurgy, Faculty of Engineering, University of Tokyo, Tokyo)

*** 東京大学大学院 (Graduate Student, University of Tokyo, Tokyo)

**** 富士製鉄株式会社釜石製鉄所 (Kamaishi Works, Fuji Iron and Steel Co., Ltd., Kamaishi)

* 温間加工の研究(第2報)

(1) Pomp: Stahldraht (Düsseldorf), 1952, 101.

(2) 西岡多三郎: 本誌, 22(1958), 225.

(3) Forrest: J. Iron Steel Inst., 200(1962), 452.

(4) Petty etc: J. Iron Steel Inst., 197(1961), 141.

(5) Caisso: Publication du Ministre de l'Air No. 357 (1960).

(6) Baird: Iron and Steel, May(1963), p.196.

(7) 橋爪 伸: 学位論文

(8) Nachtman: J. Metals, (1958), 281.

(9) 五弓, 橋本: 塑性と加工, 5 No. 45 (1964), 643.

(10) 五弓, 橋本: 本誌投稿中.

1 にロールを横から見た位置が示されている。ロールは自由に回転し、径 40 mm ϕ 、巾 16 mm であり、下ロール 4

Fig.1 Schematic diagram of the roll leveller.

個、上ロール 3 個、他にガイドロールが出入口口に各 1 個ついている。これをドローベンチに取り付け、引抜くことによつて整直を行なう。上下ロール間隔の大小で曲げおよび伸びの大きさが調整される。加工度の算定はむずかしいが、Intermesh (上下ロール中心間距離の変化) に対応する加工度が Fig.2 に示してある。全体の変形を、中立軸の

Fig.2 The relation between intermesh and reduction.

T : reduction of area by tension
B₁ : one bending reduction at the surface
B_t : total bending reduction at the surface

移動がないと仮定して引張り変形と曲げ変形の単純和と考え、引張り加工度は断面減少から直接計算し、曲げ加工度は、引抜き中にドローベンチを止め、ロールを取りはずし、曲率を測定して計算した。Fig.2 に示した曲げ加工度は、変形中の曲げ回数を考慮した材料表面の値であり、中心では零である。実際の整直作業では入口出口の Intermesh を変化させねばならぬが、考察に便利のように Intermesh は一様とした。これによつてもほぼまっすぐな線が得られた。

用いた材料は市販の 0.1% C-steel である。試料は熱間圧延材を約 60% 冷間引抜き加工した 4 mm 角材 (加工材と称する) およびこれを 680°C×30 min 焼鈍したものである。ドローベンチの引抜き速度は 2 m/min である。温間加工のための加熱は内径 50 mm ϕ の電気炉中で行ない、予備加熱温度は 350°C である。冷間加工後の低温焼鈍は、硬度上昇最大⁽⁹⁾である 300°C×10 min を用いた。

つぎに温間引張りは、直径 12.7 mm ϕ の同じ成分の材料を、両端にネジを切り、オルセン型試験機に取り付け、

gage length 90 mm のところを旋盤で径 10.0 mm ϕ に落して用いた。

加熱は、電気炉中に保持し、その他試料端部にニクロム線を巻き加熱し、温度制御は 3 ケ所で正確に行なつた。加熱温度は、300°C×15 min である。引張り後の圧縮試験片は、この有効長部分から切り出して作つた。温間圧縮は圧縮台および雰囲気を 300°C になるようにして行なつた。圧縮後の硬度測定は中央部を切り出して行なつた。引張り、圧縮ともに歪速度 $\dot{\epsilon}=10^{-2} \text{ sec}^{-1}$ になるように速度を調節した。

III. 実験結果および考察

Fig.3 は焼鈍材の抗張力、0.2% 耐力の Intermesh によ

Fig.3 Yield stress and tensile strength varying with intermesh.

W : warm working ; C : cold working ;
C+B : low temperature annealing after cold working.

る変化である。冷間加工材では Intermesh の小さいところで整直による加工軟化が生じているが、温間加工材ではそのようなことはなく、かつ低温焼鈍材より高い強度を示している。温間加工を行なうことによつて約 30% の強度上昇が得られているが、Intermesh を増加すると冷間加工材との差が幾分小さくなる。これは Fig.4 の引抜き加工に

Fig.4 Tensile strength varying with fractional reduction of area in wire drawing process.

も見られるように、軟鋼に共通した現象である。一方、高炭素鋼では加工度を上げると逆に温間加工効果が大きくな

る⁽⁹⁾。これは、軟鋼ではフェライト内の転位を固着する free な C, N の量が不足することに起因しているのである

Fig.5 (a) Cross sectional vickers hardness change in de-deformation process. A, B, C, F show the positions in Fig.1 Intermesh 8 mm.

Fig.5 (b) Vickers hardness increase with compressional strain.

う。またこのことは、高炭素鋼ではフェライト中に過飽和に炭素があるか、擬安定炭化物の分解が加工中に生じているであろうことを示している。

Fig.5(a)に Intermesh 8 mm の加工中に取り出した材料の硬度分布が示されている。硬度上昇の割合を知るために、同じ成分の材料を単純圧縮したときの硬度が Fig.5(b)に示されている。これによると、材料の中央部は Fig.2 で

計算した加工度に対応した硬度だけ上昇しているが、端部はその上昇の割合が温間加工材、冷間加工材ともに小さ

Fig.6(a) Solid lines represent tensile curves, and dotted lines compression curves after pre-strained by tension to the settled strain.

Fig.6(b) Effect of compressional strain after pre-strained by tension on vickers hardness. () represents pre-strained tensile reduction.

い。これは、繰り返し曲げにより Bauschinger 効果による軟化が生じたことによるのであろう。とくに冷間加工材にはこの傾向が大きく、引張りによる加工硬化量の等しいと思われる。中心硬度の等しい冷間加工材の C と、温間加工材の B を比較しても、端面硬度にはかなり大きな差がある。これは、温間加工の方が冷間加工より逆方向応力に対する抵抗が大きく、Bauschinger 効果による軟化が少ないことに起因していると思われる。そこで、Bauschinger 効果による軟化について調べるために、Fig.6(a)で、温間引張り、冷間引張りしたものを各々温間圧縮、冷間圧縮した材料の塑性曲線を示した。この図から明らかなように、引張加工度の小さい領域では温間加工時の Bauschinger 効果

は冷間加工のときより小さい。つぎに Fig. 6(b) には、所定の引張加工度を与えたものを圧縮した際の硬度変化を示してある。冷間引張り試料は圧縮加工において一度加工軟化を示すが、温間引張 - 温間圧縮したものは低い加工度ではこの傾向がなく、高い加工度においても軟化の傾向が小さい。このことから考えて、温間整直材の強度が冷間整直材より上昇するのは、温間加工中の加工硬化量の増大とともに Bauschinger 効果に伴う軟化が減少することが主要因をなすことは明らかである。一般に、Bauschinger 効果は多結晶試料において結晶粒子によつて変形程度の異なることに基づく特殊な残留応力によるものと考えられて来たが⁽¹²⁾、Buckley, Entwistle⁽¹³⁾によつて、単結晶においても Bauschinger 効果が存在することが明らかにされ、粒界に集中した応力のみがその主要原因であるとは考えられなくなつた。もちろん粒界の影響も無視することは出来ず、温間加工中に粒界の残留応力が解放され Bauschinger 効果が減少することは十分に考えられる。また、この温度において残留応力が解放されることは、上田⁽¹⁴⁾の実験からも伺い知ることができる。結晶粒界によらないで Bauschinger 効果を説明できる加工硬化理論としては、迂回面上で粒界、tangle-dislocation、析出物、不純原子などの障害物に pile up した転位に基づく硬化が考えられる⁽¹⁵⁾。これら pile up した転位は、転位源に対し back stress を与え、加工硬化の要因となるが、一方、pile up した転位のうち、最後部にあるものは、逆方向の応力が加わつたときそれ自身可動転位となり変形に寄与すると同時にその後転位源となる可能性もあり、低い応力で降伏がはじまることになる。これに対し、温間加工材では転位は固着されていると考えられ⁽¹⁰⁾、逆方向の応力に対しそれ自身が可動して変形に寄与したり転位源になりえないので、Bauschinger 効果は小さいと考えられる。このことから、転位を固着すると(歪時効を行なうと)逆方向に応力を加えたときの方が固着による強度の上昇が大きくなることが予想されるが、Tapwater⁽¹⁶⁾の実験によつてこれは認められているところである。

Fig. 7(a) には伸び、絞りが見られている。同じ Intermesh のものについては、絞りはほとんど変化しないが、伸びは低下している。しかし、Intermesh の大きいところでは伸びもそれほど大きくは低下しておらず、とくに Fig. 7(b) に示したように同じ大きさの 0.2% 耐力の材料について比較すると、伸びはまったく変化しない。これは温間加工材が内部構造そのものから本質的に脆いのではないことを示している。

Fig. 8 は、あらかじめ 60% 冷間加工した材料を整直したときの抗張力、0.2% 耐力を示している。冷間整直材は加工を行なうと耐力、抗張力ともに低下している。これは、

冷間加工材を整直するとき生ずる一般的な現象⁽¹⁶⁾であり、冷間加工で高めた強度が低下するのは、工業的には大きな

Fig. 7(a) Elongation and reduction of area varying with Intermesh.

Fig. 7(b) The relation between yield stress and elongation.

Fig. 8 Tensile strength and yield stress varying with intermesh. specimens: 60% cold drawn steel.

問題である。冷間整直後低温焼鈍を行ない歪時効させても、最初の強度まで回復することはなく、とくに 0.2% 耐力にはこの傾向が著しい。一方、温間加工材では Intermesh 1 mm のとき少し強度の低下があるが、一般に整直によつて強度の低下どころか上昇の傾向がある。すなわち、温間整直を行なうことによつて、整直の効果以外に強度的に大

(12) 益田：工業塑性力学，p. 6.

(13) Buckley and Entwistle: Acta Met., 4 (1956), 352.

(14) 上田：本誌，13 (1936), 1.

(15) Dieter: Mechanical Metallurgy, p. 112, 149.

(16) Tapwater: AIME, 227 June (1963), 736.

きな merit が期待できるのである。

Fig.9 は 60% 引抜き加工材を各温度に 10 分保持後、変

Fig.9 Flow stress-temperature curves at 0.025 and 0.15 strain.

形抵抗の温度依存性を測定したものである。この図から明らかなように、冷間加工材は、変形抵抗は歪によつてほとんど増加せず加工硬化の余地がないが、350°C 加工ではかなり加工硬化しているのが理解できる。すなわち、冷間整直を行なうと、加工硬化量がほとんどないため、前に述べた Bauschinger 効果に基づく加工軟化の現象のみが現われて、とくに大きな強度減少が生じてくるのである。これに対し、温間整直では、焼鈍材のところで述べたように Bauschinger 効果が少ない上、加工硬化量がかかなりあるので強度の上昇が得られるのである。

Fig.10 に絞り、伸びが示されている。絞りはほとんど

Fig.10 Effect of intermesh on elongation and reduction of area.

変化ない。伸びは低温焼鈍材が最も大きい。これは冷間加工中に生じた内部歪が除去されるためであろう。温間加工材と冷間加工材では、強度にかなり大きな差があるにもかかわらず、伸びはほとんど変化していない。これは加工中に dynamic な転位の再配列が生じ、内部応力が除去されるからであろう。

つぎに、加工所要力なびらに変形抵抗と常温強度の関係を調べてみよう。Table 1 は Intermesh 4 mm の整直における引抜力と抗張力、0.2% 耐力である。摩擦の条件などが同じであると仮定すると、引抜力と変形抵抗は対応する

と考えられる。これからわかるように、一般に引抜力の増大より強度の増加の方が大きい。そこで、変形抵抗の差が

Table 1 Relation between drawing stress, Yield stress and tensile strength.

(a) Annealing specimens.

	Drawing stress (kg/mm ²)	Yield stress (kg/mm ²)	Tensile strength (kg/mm ²)
C	6.86	28.5	34.5
B	—	35.5	39.0
W	8.32	41.0	52.0
W/C	1.21	1.44	1.41

(b) 60% Cold drawn specimens.

	Drawing stress (kg/mm ²)	Yield stress (kg/mm ²)	Tensile strength (kg/mm ²)
C	8.98	48.0	57.0
B	—	50.0	58.2
W	9.22	59.5	62.5
W/C	1.03	1.24	1.10

Fig.11 Compression stress-strain curves. Dotted lines represent room-temperature curves after pre-strained at warm working temperature.

Fig.12 The cross section of I-beam. Dotted line represents hardness measured position.

常温における強度の差とどのような関係にあるかを調べるために、各圧縮変形抵抗と、温間圧縮を所定の加工度で止めて冷間圧縮した塑性曲線を Fig.11 に示した。これによると、常温の温間圧縮材の変形抵抗は、温間圧縮のそれより約 1 割上昇している。この変形抵抗と常温の変形抵抗の

差が、温間加工の効果を示していることになる。また、1割の上昇率は常温と 300°C の弾性定数の変化に等しい。こ

Fig. 13 Cross sectional vickers hardness distribution of I-beam by warm working.

のことは、300°C の変形を支配する内部構造が常温と変わらないこと、すなわち変形抵抗の増大は、温度に依存しない加工硬化によるものであり 300°C から常温に持ち来たとき、内部構造の変化が生じていないことを示している。

最後に、応用として I ビームの整直を行なった。これは Fig. 12 の寸法のものを用いたが、工業的に重要な H 型鋼とはほぼ同様な形状を持っている。曲げ方向は矢印に示した方向で、一般に行なわれている整直とは 90° 異なっている。これはとくに、フランジの強化を目的としたからである。Fig. 13 に結果が示されている。これによると温間整直を行なうと実に硬度は 2 倍の上昇を示している。このことから、温間整直は線材のみならず型鋼に应用できることが伺い知ることができる。

IV. 総 括

温間加工法を整直加工に適用することによつて軟鋼に関

しつぎの結果を得た。

(1) 焼鈍材を整直すると、温間加工材は、冷間加工材およびその低温焼鈍材に比較して、抗張力、耐力が約 30% 上昇した。しかし、加工度が大きくなるとこの上昇量が減少するが、これはコットレル 雰囲気 を形成するための有効 C, N の減少に基づくものであり、軟鋼に共通の現象である。

(2) 焼鈍材の強度上昇の原因となるのは、温間加工時の加工硬化量の増大によるところも大きいが、その他に曲げの繰返しに伴なう Bauschinger 効果による軟化の量が減少することにも大きく依存している。引張り、圧縮の実験を組合せて行なうことにより、温間加工では Bauschinger 効果による軟化の量が少ないことが確かめられた。これは、温間加工によつてできた転位は C, N により固着され、pile up した状態で逆応力が加わつたとき、それ自身が可動転位になつて変形に寄与したり、転位源になつたりすることがないからである。

(3) あらかじめ 60% 冷間引抜き加工した材料を整直すると、冷間整直を行なつたものは抗張力、耐力ともにかなり低下したが、温間整直材は逆に抗張力、耐力ともに増加の傾向にある。すなわち、温間加工法を用いると、強度の低下なく整直を行なうことができることを示している。これは、さきに述べた Bauschinger 効果に伴なう軟化の量が温間加工では減少することと同時に、圧縮試験の結果によりあらかじめ 60% 冷間引抜き加工した材料は、その後の冷間加工ではそれ以上ほとんど加工硬化しないが、温間加工を行なうと、まだかなり加工硬化の余地があることに起因しているのである。

(4) 温間加工の変形抵抗より、温間加工後常温に持ち来た材料の変形抵抗は約 1 割上昇している。この値は弾性定数の温度依存性の変化に一致し、このことから、温間加工温度から常温に材料を持ち来たとき、内部構造に変化がないであろうことが推察される。

(5) I ビームの整直に温間加工法を用いることによつて、非常に大きな強度上昇を得た。

木原諄二氏、斎藤好弘氏、吉田 茂君に感謝する。