

§5 砂付の長さ と 壓力の降下割合の關係

以上の實驗は總べて A. F. A. の規格の砂型の大きさ即ち 2" 徑の 2" 高さのものについて行つたが此の高さの違つたものに就て考へて見ると

今 v = 通過する空氣量

t = 通過するに要する時間

P = 内部壓力

a = 試料の斷面積

h = 試料の高さ

k = 通氣度

以上の如くすれば

$$\frac{v}{t} = K \frac{pa}{h}$$

これが通氣度をあらはす式である。

此の式に於て同一砂を用ひた場合には

$$K = \text{一定}$$

斷面積を同一とし、 h の異つたものにつき考へるに先づ通氣孔の全くない場合に於ては以上の實驗により P が同一であるから試料の斷面を通る一定時間當りの空氣量は h の大なるもの程小となる爲降下がゆるやかであり一定時間後は密閉の壁の部分よりの熱の放散に依つて壓力が降下して行く、然しながら h の小なるものは此の一定時間即ち壁の部分よりの熱の放散を始める時間が h の大である場合よりも早く来る爲と内部の空氣量が小である事によつて内部壓力の比較的高き部分が長くつづく結果鑄造作業としてあまり好ましくない。次にガス抜の穴即ち通氣孔をあけた場合を考へると全く以上とは逆に h の小の方が内部壓力が時間と共に急減する。これによつて鑄棒にはガス抜穴を開ける事は必須の要件である事が

分る。

IV: 總括

以上の實驗結果を一括すると次のやうになると思ふ。

1. 鑄物砂の通氣度は同じ大きさで同じ条件でかためられた場合通氣孔をあけない場合には通氣度の良きもの程最高内部壓力が大となる、そして時間的の降下は急である。

2. ガス抜穴をあけた場合には通氣のよいもの程最高壓力も低く降下も急である。

3. 通氣のよいもの程ガス抜穴の徑の増加と共に最高壓力の減少の割合が急である。

4. 肌砂は薄くして押へ砂は通氣のよいものを用ふる事。

5. 押への少いやうな鑄型の場合には棒のガス抜穴は十分あけて置くべきである。

6. 湯に近づく程鑄物砂は強度通氣度の點に於てスクワレる事の少い鑄物砂を用ふべきである。

7. 鑄込後數秒にしてあがる内部壓力はスクワレの一つの大きな原因なる事これが爲に湯に接觸する砂はあまり通氣度の良くないものを用ひても押へに通氣のよき砂がある場合は好結果を得るやうに思ふ。

8. 肉の薄いもの即ち急冷されるやうなものにはなるべくガス抜穴、或は押へ砂の通氣度は良くすべきである。

以上通氣性と鑄造作業とにつき遭遇する諸問題につき述べて見ましたが、讀者の皆様今後の御指導をお受け致したき次第で有ります。尙最後に此の實驗を御許し下され御指導下さつた鑄造工場長始め現場の皆様に対し厚く感謝する次第であります。（昭。24. 6 月寄稿）

鋼の鍛造、壓延、絞り、引抜材等に現われる屈曲内面疵（又は皺疵）の正體とその發生條件に就て

（第 36 回講演大會講演，昭和 23 年 10 月於大阪）

高 島 徳 三 郎*

STUDY ON THE FLAWS WHICH OCCUR ON THE SURFACE OF THE INSIDE OF BENT STEEL.

Tokusaburo Takashima

Synopsis:—

The author formerly recognized that when a steel plate or bar was bent by compression, a defect which is a sort of flaws occurred at the inside of bent part. As the result of study on the nature of flaws which was made by experiments under various conditions, following results were obtained.

- (1) The flaws are not caused by the deformation of surface layer of steel, but are caused by the fracture of steel itself due to partially concentrated stress at the inside of bent part.
- (2) The flaws occur in almost every kind of steel.
- (3) The depth of flaws differs according generally to the principles of strength of materials.
- (4) The flaws occur considerably affected by temperature, grain size and properties of surface of steel.

目 次

I 緒 言

II 實驗方法

- 1. 試験片の形状
- 2. 供試材料
- 3. 試験片の屈曲方法及び疵發生位置

III 實驗結果

- 1. 壓縮後の試験片の形状と各部に於ける疵の長さ
- 2. 屈曲方法による影響
 - (1) 試験片の厚みを變えた場合
 - (2) 屈曲度を變えた場合
 - (3) 屈曲の際の槌打回数を變えた場合
 - (4) 屈曲速度を變えた場合
- 3. 加熱温度による影響
- 4. 加熱時間による影響
- 5. 鋼種による影響
- 6. 結晶粒度による影響
- 7. 真空中屈曲の影響
- 8. 表面被覆の影響

9. 熱處理の影響

- (1) 屈曲後焼入せる場合
- (2) 屈曲途中軟化焼鈍せる場合

IV 屈曲内面疵の發生原因とその疵形成機構の考察

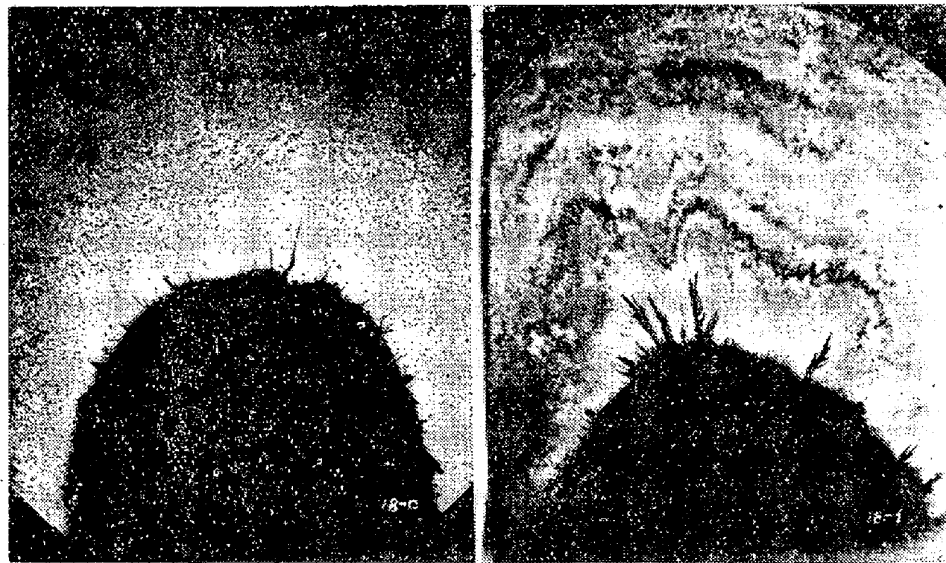
V 屈曲内面疵の製品に發生せる實例とその有害性

VI 總 括

VII 結 論

I. 緒 言

先年著者は小形壓延棒鋼に發生せる表面疵の原因を調査中、棒鋼等の表面に屢々現われる短小なる縦疵即ち一般に皺疵と呼ばれるものは鋼材を極度に折り曲げる際にその内側に發生する一種の疵と發生機構上から、同種類の疵なることを多數の實驗によつて明かにし、この種の疵に對して屈曲内面疵（第1圖參照）と假稱し、他と區別して置いた⁽¹⁾。即ち著者の言う屈曲内面疵とは、折り曲げる材料に特別の材質的缺陷なく、且つ相當の韌性を有するものである限り、屈曲部分の外側（凸部）に發生



第 1 圖 鋼に發生せしめた屈曲内面疵（1000°C に於て屈曲し内側に發生せるもの）×30（縮少）

A. 0.2% 炭素鋼の場合

B. 95kg Ni-Cr 鋼の場合

* 日本鋼管川崎製鐵所技術研究所

することなしに、内側（凹部）にのみ發生する特殊なる疵を指すのである。従來この種の疵に就て特に着目せる研究者は無いようであるが、極く少數の實際家には既に注意されていたことは斷片的記録によつて知られる。但しその發生原因に就ては未だ充分に解明せられていないように思はれる。例えば獨逸の H. Cramer⁽²⁾は棒鋼の表面に見られる不連続縦疵に對して Druckfältunggrisse（壓迫皺疵）なる語を使用しているが、これに就ての詳しい説明はなされていない。又米國の W. Trinks⁽³⁾もその著書中に棒鋼の孔型歴延に際し、Flat spots 或は Onerfills 等がダイヤモンド型孔型に挿入されて歴延される際に往々 Pinching（挟み込み）或は Falding（疊み込み）を發生する事あることを述べているが、この疵の正體に就ては詳かにされていない。我國の例としては堀岡米吉氏⁽⁴⁾がクランクシャフト等を鍛造する際、屈曲加工部の内側に一種の疵を發生することに着目されているが、その發生機構は餘肉が押し出され、その合せ目が進行し本體に進入して生ずる缺陷と考えられ、これに對して重褶疵なる語が使用されている。これを要するに従來諸家の間に於てもこの種の疵の生成機構は比較的單純に考えられ、（折れ込み）（餘肉の重なり）或は（皺の疊み込み）等の語が使用せられていることより察し得る如く、單に鋼の周邊部が粘性變形により變入し、密着して生ずる一種の折込現象に基づく疵の如く解されているようである。勿論折込による疵は特殊の場合に發生することは認められるが、著者の觀察によれば歴延或は鍛造材等の壓縮部に現はれるものは主として屈曲内面疵で折込による疵は寧ろ稀なるものである。この點これら諸家の擧げている疵の正體については更に検討するの必要を感じる。

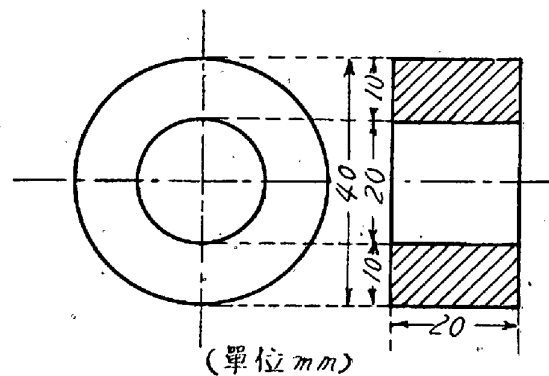
屈曲内面疵は單に現象的に興味あるばかりでなく、實際上各種の鋼材に於て鍛造、歴延、絞り、引抜き等々なる加工方法による鋼材に普通に認められる表面疵でその有害性の及ぼす範圍、程度共に決して輕少でないと考えられるのである。例えば原因不明の加工割れ、熱處理割れ、局部的異常腐蝕、或は疲勞破損等、従來看過せられていたこの種の疵が原因せる場合も相當あるものと考えられる。従つてこの疵の發生原因、本體等を究明し、よくその特性を知悉することは鋼材の製造、加工、熱處理等廣く鋼材加工の技術的方面に重要意義を有することは言うまでもない。即ち本研究は以上の見地より、主として鋼に生ずる屈曲内面疵についてその正體、發生條件等を確めたものである。なおこの研究につき結論のみの概要は先に發表（鐵と鋼誌第 29 年第 10—11 號 20 頁）して置いたが、今回二三の補遺的研究を遂げたので、こ

ゝにこれが内容の詳細と共に一括報告する次第である。

II. 實驗方法

1. 試験片の形状

屈曲内面疵は通常直線狀の棒鋼を屈曲すれば發生せしめ得るが、本研究に於ては取扱の便宜上輪狀の試験片を壓縮して發生せしめることとした。試験片は原材の寸法 42—43mmφ 程度の歴延或は鍛造せる棒鋼より切り出し、これを旋削して内外面をよく仕上げ全く疵無き状態とせるものである。その形状及び寸法は第 2 圖の如くである。



第 2 圖 試験片の形状及び寸法

2. 供試材料

供試材料は主として第 1 表に掲げた 11 種類の鋼種である。各實驗條件によつてこれらのうち適當のものを選んだが同表中 No. 1（低炭素鋼）No. 2（高炭素クロム鋼）No. 3（95kg Ni-Cr 鋼）の 3 鋼種は諸實驗を通じて使用し比較検討した。

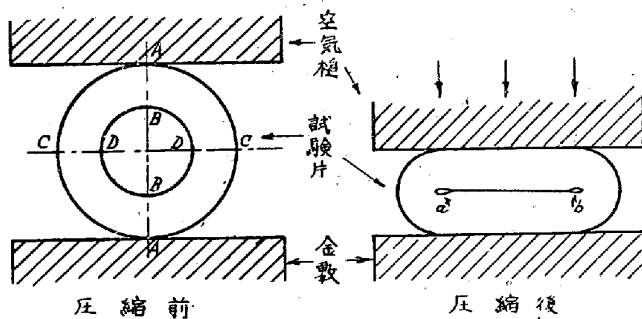
3. 試験片の屈曲方法及び疵發生位置

實驗方法は輪狀試験片を直徑方向に壓縮して内側に發生せる疵を検することとした。使用壓縮機は實驗の便宜上主として 250kg 空氣槌を使用し、試験片を金敷上に乗せて壓縮したものである。但し屈曲速度の影響等を見るために油壓式壓縮機も用いた。本研究に於て空氣槌を主として使用せる理由は實驗中に於ける試験片の溫度降下を可及的少許にとゞめるため、かなり急速に壓縮する必要上からで、又常溫壓縮等に於ても壓縮荷重の不足を避けるためであつた。なお試験片の加熱は瓦斯爐により、原則として 1100°C に 10 分間加熱せる後これを爐外に取出し、1000°C に達したところで直ちに壓縮することとしたが鋼種により冷却速度が異なる故に各鋼種について冷却速度を測定し置き、時間的に所定溫度の決定を行つた。以下各條件による壓縮實驗に於て特に斷りなき場合の加熱及び壓縮溫度條件は上述の如しと承知ありたい。

第 1 表 供試材料の化學成分

試料 No.	鋼 種	化 學 成 分										
		C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	W	Mo	
1	0.2% 炭素鋼	0.20	0.28	0.46	0.026	0.019	0.16				—	—
2	高炭素クロム鋼	0.95	0.28	0.28	0.014	1.011	0.17		1.53		—	—
3	95kg Ni—Cr 鋼	0.32	0.22	0.47	0.022	0.008	0.24	3.26	1.15		—	—
4	低炭素鐵	0.01	0.09	0.17	0.061	0.036	—				—	—
5	0.6% 炭素鋼	0.64	0.20	0.26	0.049	0.034	—				—	—
6	1.2% 炭素鋼	1.27	0.16	0.37	0.053	0.033	—				—	—
7	耐熱 Ni—Cr—W 鋼	0.45	0.80	0.40	0.022	0.009	—	1.83	15.69	2.86		—
8	18—8 系不銹鋼	0.14	0.19	0.17	0.018	0.007	—	7.85	16.69			—
9	13%Cr 系不銹鋼	0.28	0.40	0.47	0.023	0.007	—		11.20			—
10	110kgNi—Cr—Mo 鋼	0.33	0.20	0.46	0.020	0.008	—	3.30	3.63			0.56
11	高 Cr—Mn—Mo 鋼	0.28	0.30	0.90	0.014	0.007	—		2.36			0.25

なお壓縮時の空氣槌による打撃回数は疵の長短に影響することが豫備實驗により認められたので原則として3回の打撃により規定量の壓縮を完了する如くした。この場合壓縮量の過不足を防ぐため試験片に併列して金敷上に基準高さの小鋼片を置いて行つた。試験片の壓縮狀況は第3圖に示せる如くである



第3圖 試験片の壓縮と形状の變化

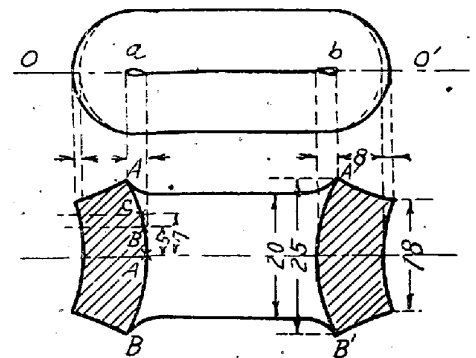
今試験片が壓縮される場合の變形過程を材料力學的見地より考察すれば次の如くなると思う。第3圖左方に於て當初壓縮は垂直断面A, Bより始まるからA點では壓縮應力, B點では引張應力を受け, 最も大なる應力は, はじめこの點に集中すべきである。この場合若し材料が甚しく脆弱なものであれば破斷はA B附近特に主として引張應力を受けるB點より始まると思はれるが, 試験片の材質はどれも相當の靱性を有するからこの断面より破斷せずに荷重が加わるに従つて永久變形して楕圓形となり, 接觸部Aの面積が次第に擴大されると共に水平断面に於けるC及びDの曲率が小さくなる故A Bの應力が減少する反面C Dの應力は増加する。而して圖に於ける上下のB點が接觸するに至つてC D断面に於ける應力が最大に達することとなる。この場合曲率半径はC點より

もD點が一層小なる故應力集中はD點に於て最も大となるべきである。故に破斷が起るとすればD點より先に起る可能性が考えられる。事實壓縮せる試験片を見るにD點に疵發生が認められるがC點には認めない。即ち本研究に於てはこのようにして發生せる疵即ち第3圖右方に示せるa部及びb部に發生せる疵を顯微鏡により擴大して検することとしたのである。

III. 實驗結果

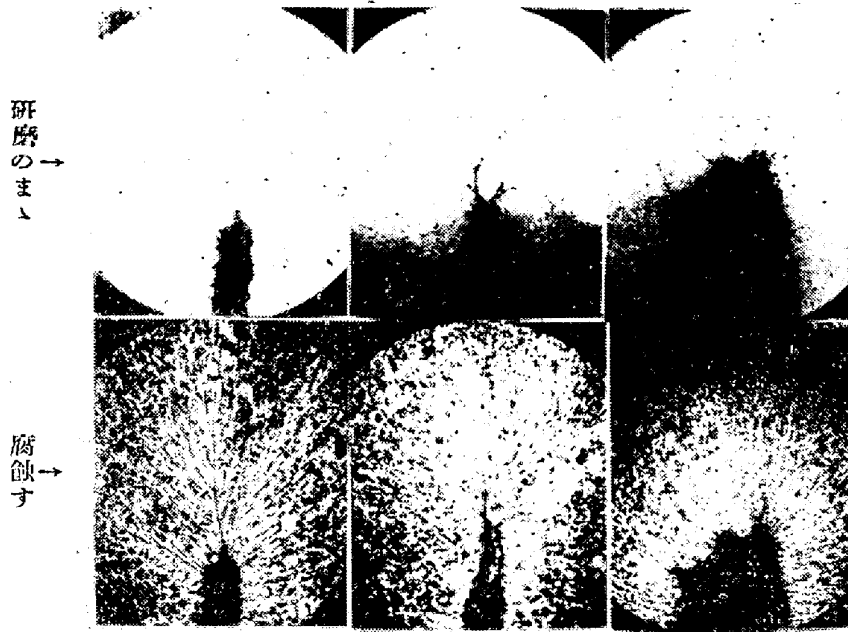
1. 壓縮後の試験片の形状と各部に於ける疵の長さ

壓縮せる試験片の變形狀態は第4圖の如くである。上圖は側面より見たる形状, 下圖はO—O'線より上下に開いた場合の半面を示す。これを見ると各部に於ける壓縮と擴がりの變形狀況は單純でないことがわかる。疵は下圖A—B及びA'—B'の弧狀線に沿うて發生する。而して弧狀線の頂點附近の疵が最も長く, それより外方に



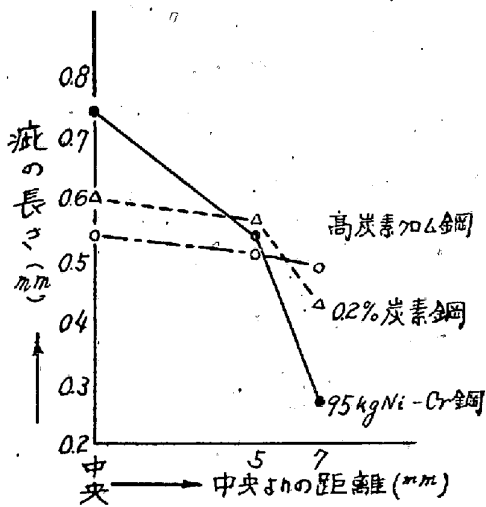
第4圖 壓縮後の試験片の形状と疵發生位置

遠ざかるに従つて短小となる。第5圖は95kg Ni—Cr鋼の場合に於ける各部の疵の狀態を示せるものである。こ



第5圖 壓縮後の試験片の位置と疵の形状
(95kg Ni-Cr 鋼の場合) ×70 (1/2 縮寫)

A. 中央部 B. 中央より 5mm 外部 C. 中央より 7mm 外部



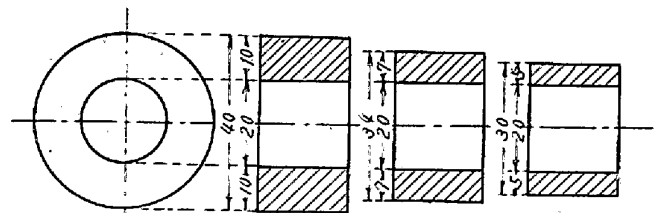
第6圖 壓縮試験片の各位置に於ける疵の長さ

常試験片数2個について測定し，これらを相加平均して比較することとした。

2. 屈曲方法による影響

(1) 試験片の厚みを変えた場合

本実験に於ては第7圖の如く，試験片の厚み（同圖影線の部分）を種々に變えて壓縮せる場合の影響を見たもので第8圖は各壓縮後の試験片について疵の長さを測定せる結果である。即ち厚みの厚いもの程疵が長くなる。



第7圖 試験片の厚みとその形状

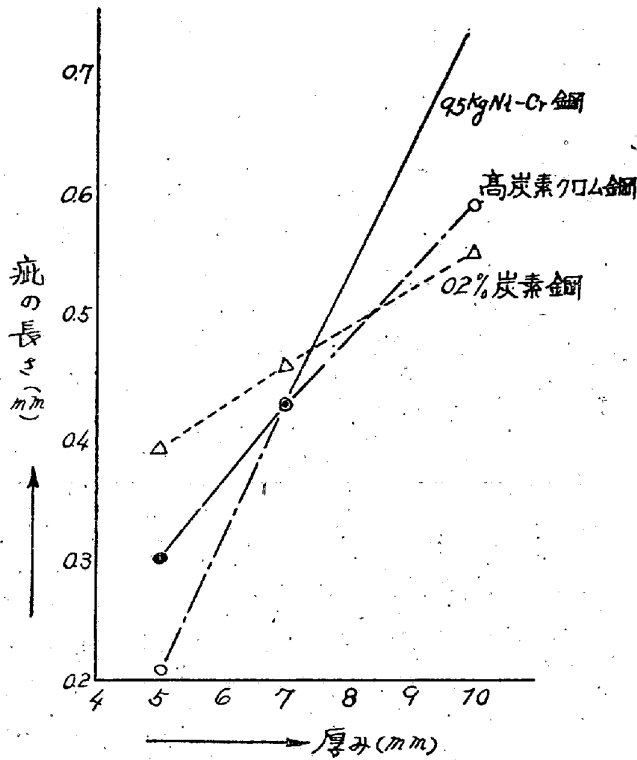
こゝに厚みの變化は換言すれば壓縮應力の變化なる故結局發生せる疵の大小は應力の大小によつて影響されるものと言ひ得るであらう。第9圖は試験片の厚みにより疵の長さが變化する狀況を示せるものである。

(2) 屈曲度を変えた場合

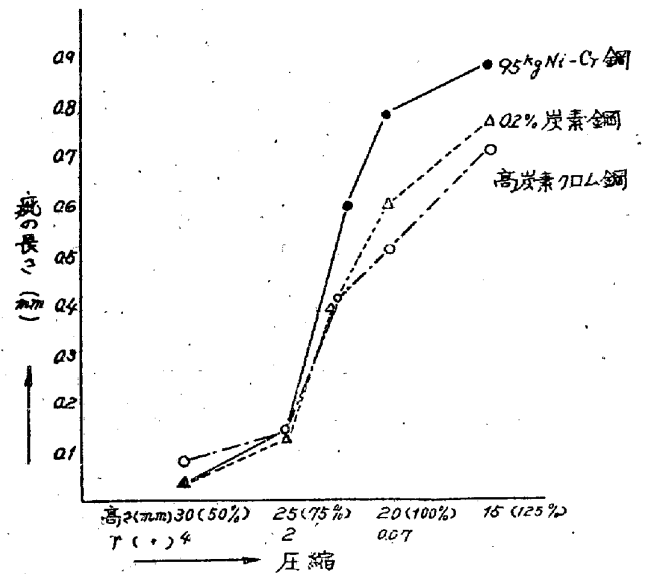
第2圖に示せる基準寸法の試験片をとり，これを種々なる程度に壓縮して見ると内徑高さ 10mm (壓縮率 50%，曲率半径 4mm) 程度より内面に明瞭な皺が認められるに至り同時に疵が發生しはじめ，以後壓縮度を増すに

これらの疵は試験片を壓縮方向に平行に切斷してその斷面を檢鏡せる状態である。又これらの疵を3鋼種について實測せる結果は第6圖の如くである。即ちこれによるも中央部に於ける疵が最長で，それより外部に至る程短くなることわかる。かくの如く壓縮後の試験片の疵が中央と外部とで長さに變化がある理由は材料の部分的壓縮と擴がりの相殺關係により各部の加工率(或は破壊度)が異なるためであらう。

この關係は第4圖下方圖について各部の變形状態を見れば首肯し得ると思はれる。かくの如く疵の長さは試験片の位置により差異があることを知つたので以下各種の實驗に於て疵の測定は中央の最長部分のものをとり，通



第8圖 試験片の厚みによる発生疵の長さの變化



第10圖 屈曲度の大小と疵の長さの變化



第9圖 試験片の厚みによる発生疵の長さの變化状態 (Ni-Cr-Mo 鋼の場合) ×30 (約 8/5 縮寫)

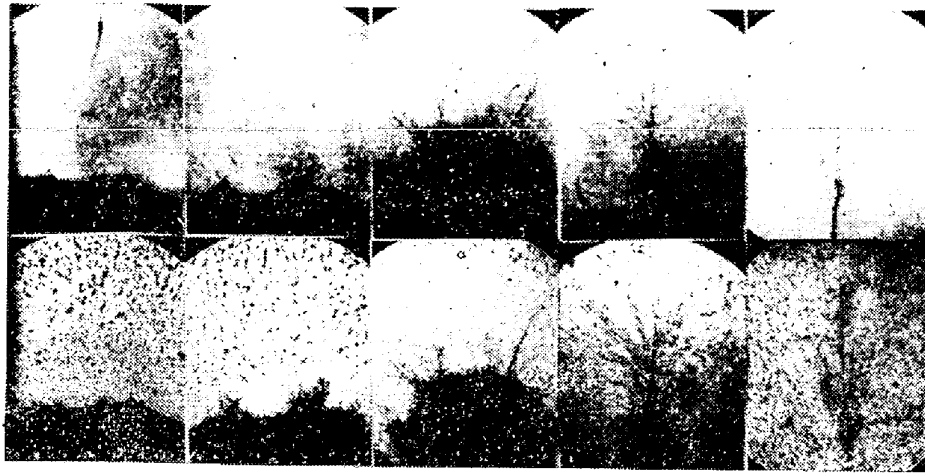
(1) 厚み 5mm (2) 厚み 10mm (3) 厚み 13mm (4) 厚み 20mm

従つて屈曲部の内側の曲率半径もますます小さくなると共に疵の數と長さを増す。この場合内側の全く密着せるもの即ち 100% 壓縮以上のものは疵の長さのみ増加するが數は殆ど變化しない。屈曲度による疵の長さの變化は第 10 圖の如くである。なお 0.2% 炭素鋼の場合について種々なる屈曲度に於ける疵の状態を示すと第 11 圖の如くである。この實驗の結果を検討するに疵の發生は本實驗に使用せる試験片の寸法及び壓縮條件に於ては鋼種により多少の差異はあるが、曲線上より見ると内徑高さ 15mm 屈曲部内側曲率半径 6mm 程度より現はれはじめ屈曲内側の曲率が小さくなるに従つて疵の長さを増し、實際疵として認め得る程度のもは半径 4mm 附近からで、曲率半径 2mm 附近より急に長さを増すことが認められる。

(3) 屈曲の際の槌打回数を變えた場合

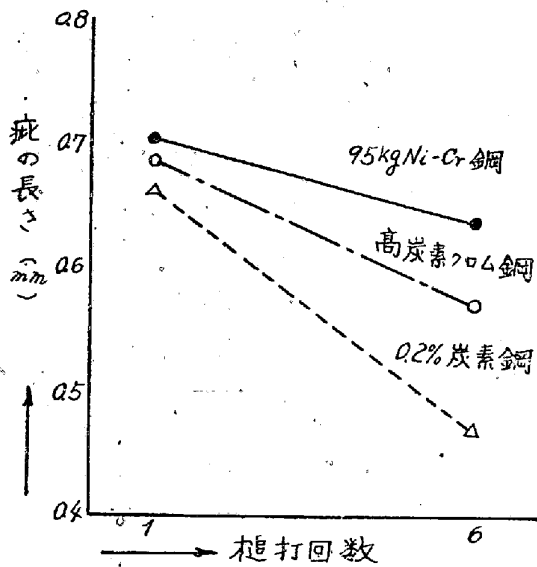
空氣槌によつて壓縮する場合考えねばならぬことは所望の屈曲度迄達せしめるための槌打回数による影響である。槌打一回で壓縮を完了せる場合と數回行つた場合とで疵の長さに變化があるかどうか、これについて實驗せる結果は第 12 圖の如くである。即ち槌打回数 1 回の場合には數回槌打して壓縮せる場合に比較してやゝ長い疵が發生する。この理由を考察するに即打回数少なき場合はハンマーをより高き位置より打下す必要上各回の材料に與える歪量は大きい。又速度が大きくなるためこれが材料の歪み速度以上に達する場合は一層局部的に破壊が進行することとなり、結局深き疵を發生する結果となるものと思はれる。

(4) 屈曲速度を變えた場合



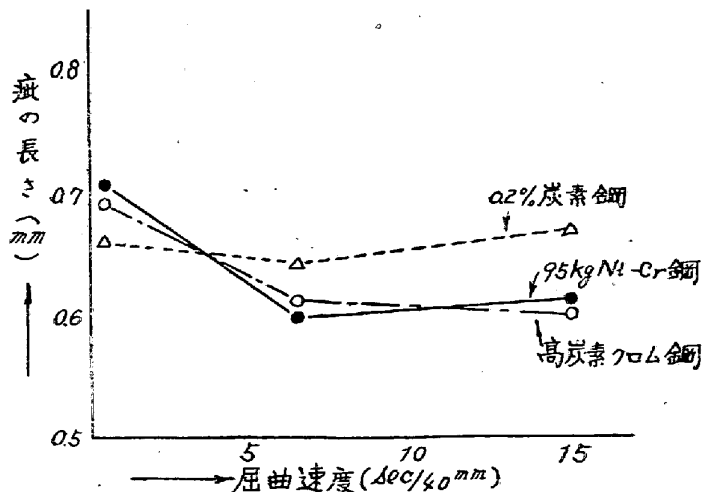
第 11 圖 屈曲度と疵の長さの變化狀況
(0.2% 炭素鋼の場合) ×70 (約 1/3 縮寫)

A. 25% 壓縮 B. 50% 壓縮 C. 75% 壓縮 D. 100% 壓縮 E. 125% 壓縮



第 12 圖 槌打回数による疵の長さの變化

試験片を屈曲する場合速度の影響が當然考えられる。よつてこれを検するため、空気槌及び油壓式壓縮試験機を以て壓縮速度を變えた場合について實驗して見た。こ

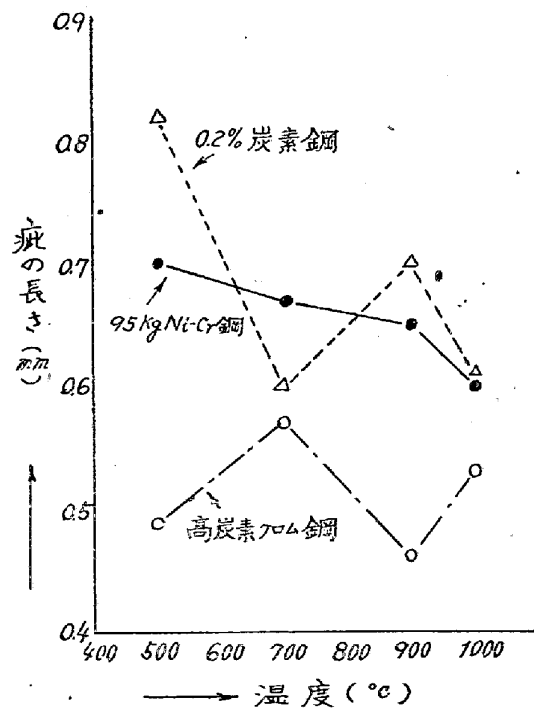


第 13 圖 屈曲速度と疵の長さの變化

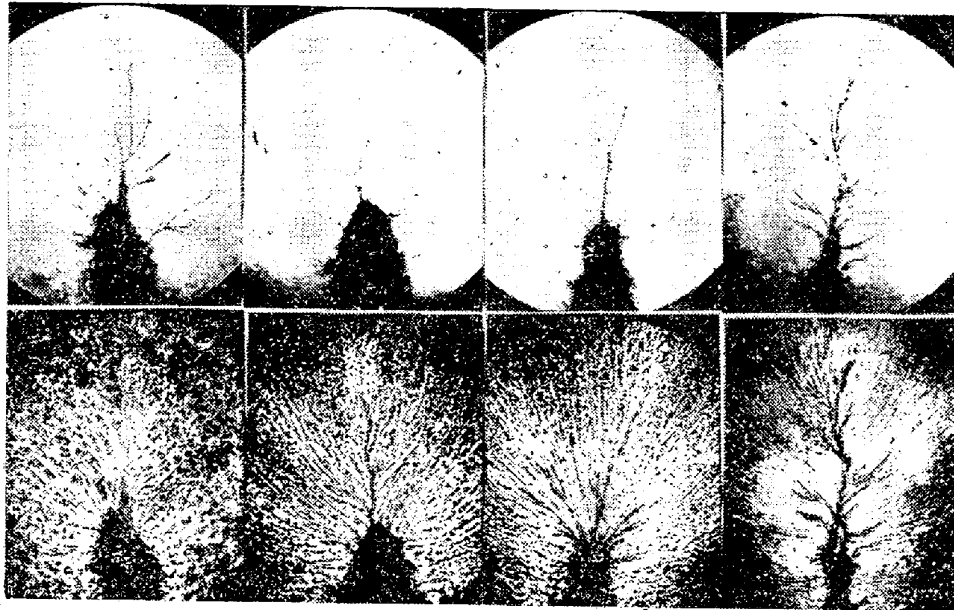
の結果は第 13 圖の如くである。これによると壓縮速度の遅いものは速いものよりも僅かながら疵が短小となつて現はれる。この結果は前項槌打回数の影響と比較しても當然かくあるべきであらう。但し圖に於て速度 15sec/40mm のものはやゝ上昇の傾向となつてゐるが、これは試験片の溫度降下に基因せる上昇と考える

3. 加熱溫度による影響

屈曲時の溫度の影響を實驗せる結果は第 14 圖の如くである。本實驗に於て試験片の各溫度に於ける屈曲時の溫度測定は困難であるが、著者は比較的高溫の場合には副



第 14 圖 試験片の屈曲時の溫度と疵の長さの變化



第 15 圖 屈曲時の試験片の温度と疵の長さの變化

(95kg Ni-Cr 鋼) ×70 (約 1/2 縮寫)

(1) 1000°C 屈曲 (2) 900°C 屈曲 (3) 700°C 屈曲 (4) 500°C 屈曲

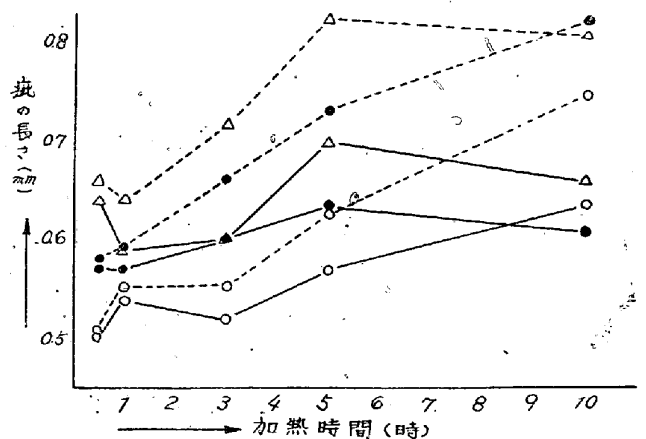
試験片に熱電對を挿入して所望温度に達した時に主試験片の壓縮を行い，500°C 程度以下の場合には表面接觸温度計によつた。又圖中には 500°C 以下の場合を除いてあるが，この温度以下は所謂青熱脆性範圍に入り，壓縮後の試験片は大破して眞の疵の長さを測定出来なかつたためである。なお常温に於けるものも殆ど切斷状態の疵となるものが多く，且つ疵の測定困難なるためこれも圖よりは除いた。この結果によると疵の長さは大體温度が高くなるほど短小になる傾向が見られる。但しこれは一般の見解で局部的に或は鋼種によつてこの關係は必ずしも連續的變化をなさない。今 0.2% 炭素鋼の場合について見るに疵が長く現はれる温度の順位は 500°C 900°C 700°C となる。この變化が如何なる機械的性質と關連あるかについて考察するため高温引張試験の結果と比較するに大體伸率と最も類似した關係があることが認められる。第 15 圖は屈曲時の温度と發生せる疵の状態を示す。

なお本實驗に於て各試験片ははじめ全部 1100°C 迄昇温加熱し，これを冷却しつゝ各温度に於て屈曲せるもので，これを常温より昇熱しつゝ屈曲する時は各試験片の脱炭程度が異り比較上妥當でない。よつて本實驗に於ては前者の方法によつたものである。

4. 加熱時間による影響

鋼を空氣中に於て長時間加熱する時は表層に於ける酸化脱炭作用が行われ，Cu 等の含有量高きものは Cu の濃縮等も行はれ易いし，又結晶粒の成長等も伴つて鋼の表層部はかなり材質的に變化がある筈である。而してこ

れらの變化は相當高温で長時間の場合にその影響が甚しいことは言うまでもない。本實驗に於てはかゝる表面的材質變化が疵發生に如何に影響するかを見るため，試験片の加熱温度を 1100°C とし，その温度に於ける保持時間を 30 分より 10 時間迄の範圍に就てその影響を比較した。その結果は第 16 圖の如くである。但し圖中の實線は Scaling による厚み減少のままの状態で壓縮せる場合の結果で，點線は第 8 圖曲線等を参照してこれを同一厚みの場合に補正した想定結果である。實驗に際し，加熱は瓦斯爐を使用し，加熱試料は全部一旦常温迄冷却し，改めて各試験片を 1100°C 迄再熱し，1000°C に於て壓縮せるものである。再熱せる理由は加熱時間が異なるため各試験片の結晶粒の差異による影響を避けるためである。この結果を見るに長時間加熱の場合は疵の長さがいづれも長くなつており，明かに表面的な材質變化の影響があることが考えられる。

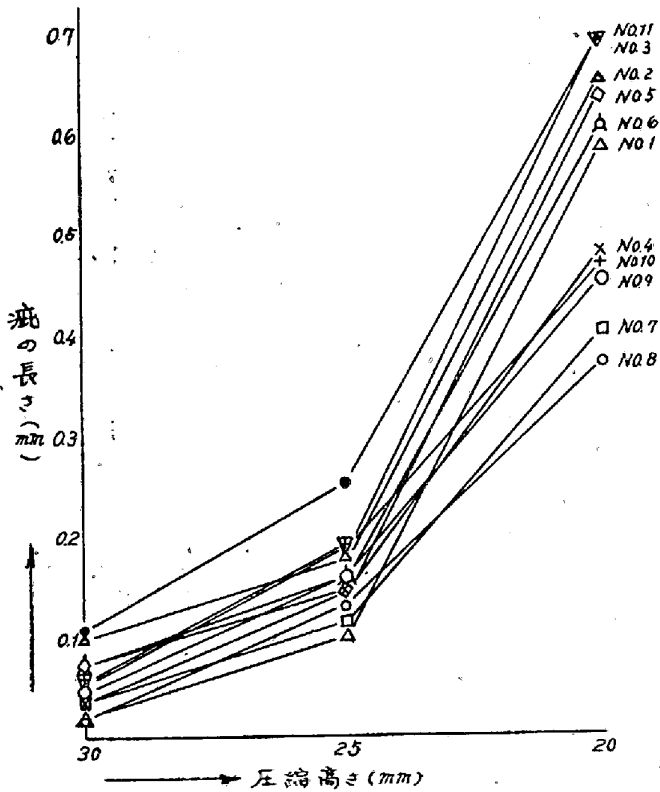


第 16 圖 加熱時間による疵の長さの變化

5. 鋼種による影響

前述の如く屈曲内面疵の大小は主として屈曲應力に左右されることより見て同一寸法の試験片の同一屈曲度迄の壓縮應力は鋼種により差を來す以上發生疵の長さは鋼種により影響を受けることとなるであらう。本實驗はこの點を確かめるため第1表に掲げた化學成分の各種の鋼材により、全部同温同屈曲度（或は壓縮度）に於て發生せる疵の長さを比較して見た。その結果は第17圖の如くである。

即ちこの結果を見るに各屈曲度共疵の長さの順位は略鋼種によつて定まり曲線上より見ても甚しい錯綜はない。本實驗は疵の長さが僅かの差なる故統計的にはやゝ試料不足の憾みはあるが、大體鋼種の影響を認め得ると考える。



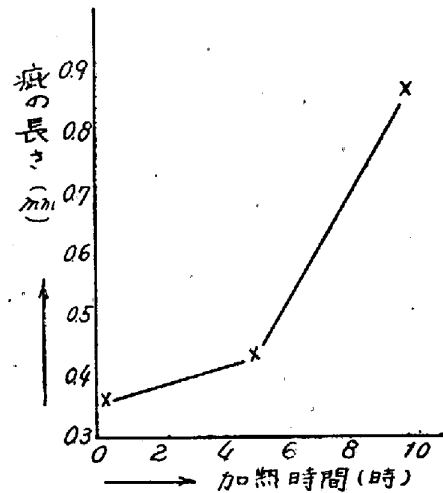
第17圖 鋼の種類と各屈曲度に於ける疵の長さの比較

6. 結晶粒度による影響

鋼の結晶粒度は材質に至大の影響あることは言うまでもない。各種の鋼について結晶粒度と屈曲内面疵との關係を見ることは相當實驗上の困難があるが、著者は便宜上 18-8 系タングステンクロム鋼を使用し、加熱時間を種々に變えて結晶粒の大きさを變化せしめ、これを壓縮して疵の長さを測定し、これによつて一般の場合を推察することとした。第18圖はその結果で結晶粒度を示す代りに加熱時間を横線にとつて示した。實際結晶粒の大

きは第19圖を参照せられたい。この實驗結果によれば疵の長さは結晶粒の大きなもの程長くなつてゐる。即ち結晶粒の大なるもの程材質は概して脆弱となることは一般常識であるが疵も長くなることは當然であらう。

なお第19圖左下は疵の周囲の酸化物の状態を參考迄に示せるものである。一般に他の鋼種に於ても同様高温（比較的低温に於ても）に於ける裂疵發生の際は疵の周囲に斯くの如き酸化物が瞬時的に發生することが認められる。



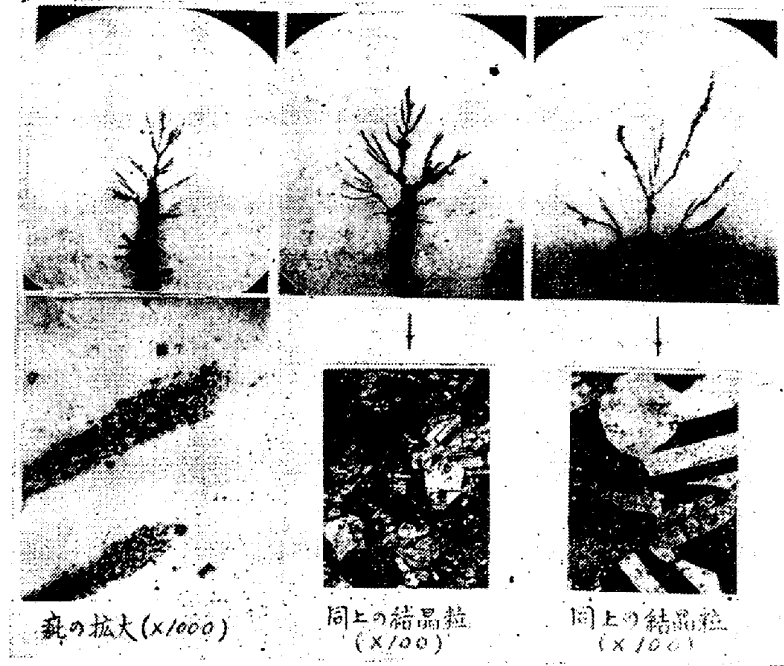
第18圖 結晶粒の大きさと疵の長さの變化

7. 真空中屈曲の影響

以上各種の條件下の實驗は試験片を大氣中に於て屈曲せるものであるが、本實驗に於ては試験片を大氣より遮斷せる状態で屈曲せる場合の影響を見るため真空状態で加熱屈曲を行つたものである。その方法は試験片を内徑のよく合致せる鋼管中に嵌め込み、一端を瓦斯熔接し、他端に細いチューブを熔接してこれを吸引ポンプに連結して空氣を抜きこれをそのまま加熱して壓縮したもので、この場合の真空度は 5mm であつた。第20圖はその檢鏡状態である。これを見ると真空状態に於ても疵の形状は空氣中の場合と何等變つてゐない。即ち鋼表面の酸化脱炭或はスケールの生成はこの疵の發生に何等根本的な條件となり得ないことがわかる。

8. 表面被覆の影響

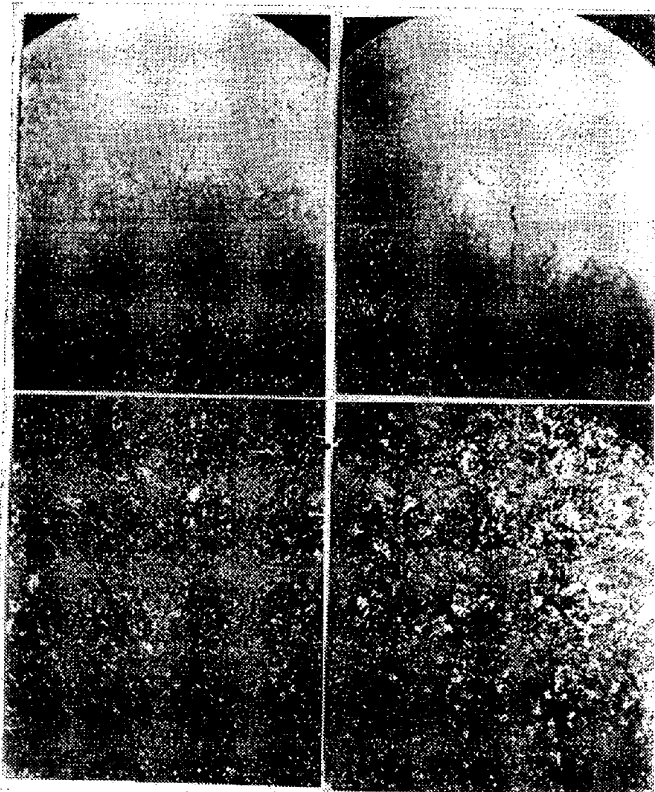
これまでの實驗は鋼の表面は本體そのままの状態で行つたが、本實驗に於ては表面被覆又は鍍金加工等を施して屈曲して見た。その結果は第21圖に示せる如くである。同圖(1)は表面に木炭の粉末を塗布せるもので、疵發生狀況及び疵内の酸化物の状態は鋼表面を被覆なしの状態で行つたものと少しも異つてゐない。(2)は試



第 19 圖 結晶粒の大きさと疵の状態

(18-8 系タングステンクロム鋼) (約 1/2 縮寫)

(1) 1100°C 5 分加熱 × 70 (2) 1100°C 5 時間加熱 × 70 (3) 1100°C 10 時間加熱 × 70

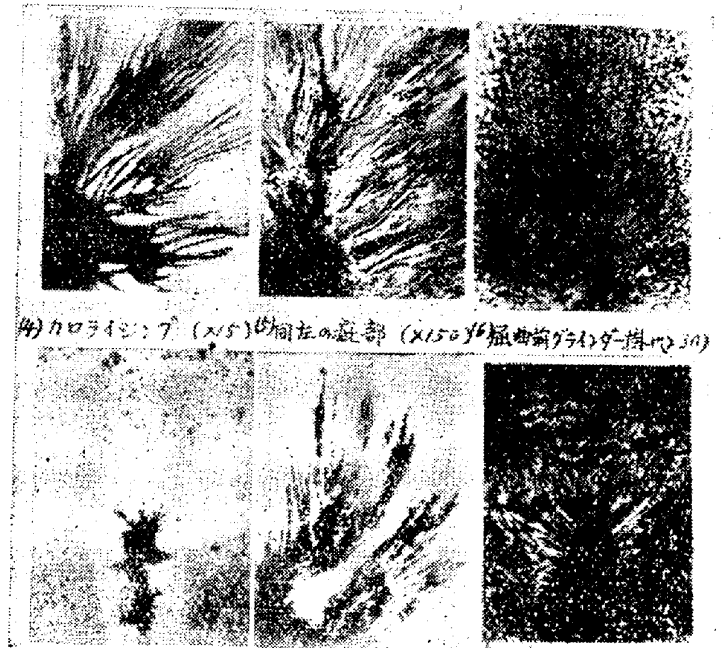


第 20 圖 真空中屈曲による疵の状態

× 70 (約 2/3 縮寫)

(1) 高炭素クロム鋼 (2) Ni-Cr 鋼

驗片を硫酸銅の溶液中に少時沈漬して表面に多孔質の Cu を沈着せしもので疵の形状は變りないが，疵の部分の酸化は Cu により相當防害されたようで酸化程度は少



第 21 圖 鋼表面の被覆，加工，或は研削後

屈曲の疵の状態 (約 1/2 縮寫)

(1) 木炭末塗布 × 150 (2) Cu 沈着 × 150 (3) Ni の電氣鍍金 × 150

い。圖に於て白色の部分には破壊と酸素進入により組織が變化した部分で酸化物が隙間に添うてなお少量發生しているのが見える。(3) は Ni の電氣鍍金を施せるものでこの場合の鍍金層の厚さは 0.02mm である。即ち疵は Ni 層を貫いて内部の鋼の部分に達し，疵内の酸化物は

少量である。しかし鋼の部分は餘り脱炭が見られない。これは Ni 層のため加熱の際の酸化脱炭作用が妨げられたためであらう。又は Ni は疵の入口に相當入り込んでいるが、これは壓縮作用により、發生せる疵の間に添うて一部が押込まれたように考えられる。この事實より考えると鋼表面を被覆なしの状態に於て屈曲せる場合疵内に見られる酸化物は一部はこうした機構により表面スケールの機械的押込みもあると考えられるが主體は疵發生直後の酸素進入によつて發生した酸化生成物と見るべきであらう。

次に(4)は鋼の表面にカロライジング法によつて Al 層を形成せるもので、この場合の輪狀試験片は便宜上小形のものを使用した。即ち鋼の厚み 4mm, Al 層の厚さ内外各 1mm, 結局本實驗に於ける試験片の厚みは 6mm である。従つて疵も短小で鋼の部分にまで達するに至らず, Al 層内だけにとどまつている。即ちこの實驗によつて考えると、屈曲内面疵の發生は表面的現象であること、及び鋼表面が開放状態になつてゐることが必要條件なることがわかる。(5)の寫眞圖は Al 層内に於ける疵を擴大せるもので疵の形狀は鋼に發生せるものと少しも異つていない。疵内に酸化物が見られるが、これは恐らく Al の酸化物と考えられる。次に(6)は加熱せる鋼の棒材を屈曲直前グラインダーに掛けて表面のスケール及び脱炭層を除去せるもので、この疵の發生は鋼表面のスケールの押込が本體なるかの疑いもあるにより特

にこの實驗を行つて見たものである、即ちこれによるも表面のスケールや脱炭層はこの疵の形成に直接の關係がないことがわかる。

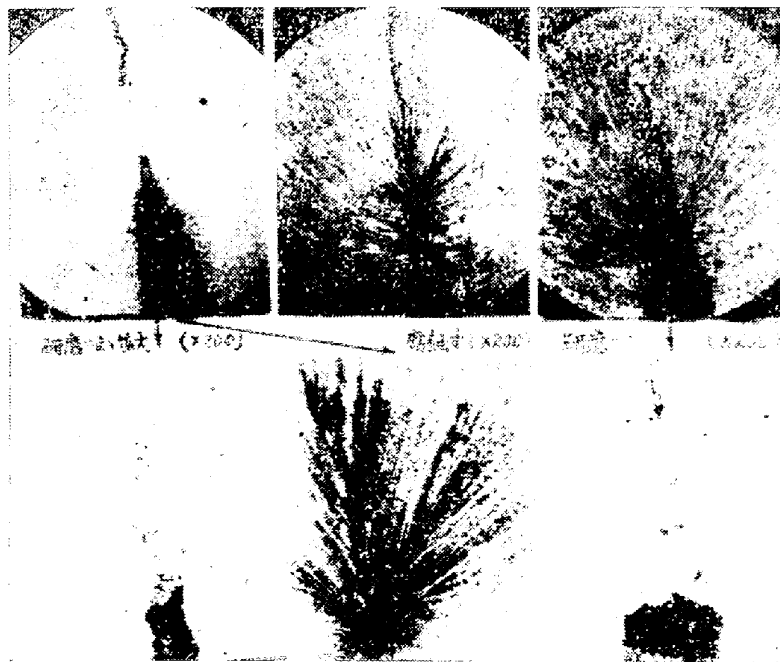
9. 熱處理の影響

(1) 屈曲後焼入せる場合

第 22 圖は屈曲後榮種油中に焼入せる場合の組織状態で、焼入温度は不明であるが、少くとも A_{r1} 點以上より焼入されたことは組織上よりも明かである。焼入後の結果について特異點を列挙すれば、疵はマルテンサイトによく發生せる部分を選んで進入してゐることで所謂フェライトライン中を通過するものは餘り見ない。即ちこれによつてもわかる如く屈曲内面疵は鋼の周邊が壓縮によつて入込んで出來たと考える如き單純なものではなく、明かに破斷による疵が主體であることがわかる。又注目すべき他の點は焼入前に存在した屈曲内面疵より焼割が發生してゐることである。これから考えるとこの疵は焼割等の誘因となる可能性が強いことがわかる。

(2) 屈曲途中軟化焼鈍せる場合

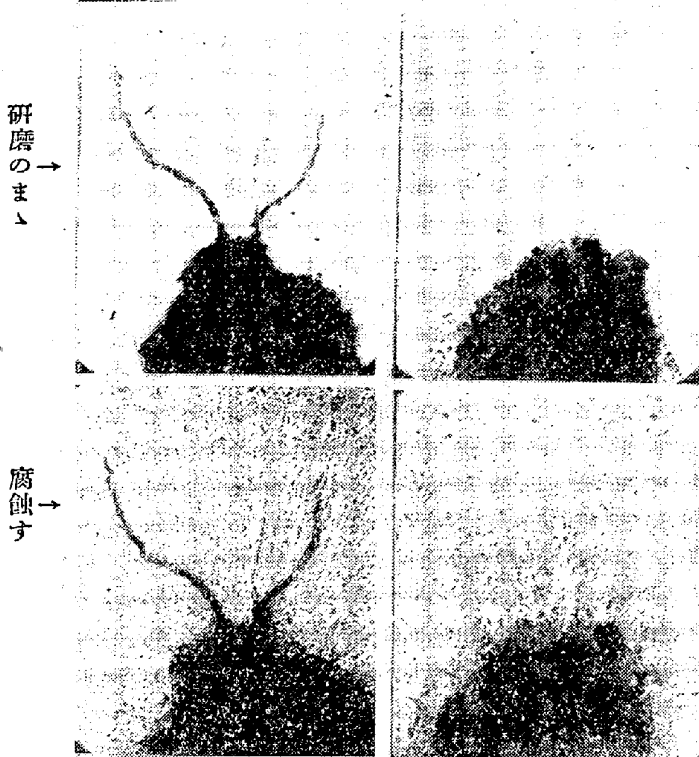
以上各種の條件により屈曲實驗せる結果屈曲内面疵の發生は屈曲部の内側部が集中應力により加工硬化することに原因する如く考えられるにより、この加工硬化を避けるため屈曲を二三段階に分けて行い、各段階毎に少時間爐中に保持し、軟化しつゝ屈曲せる場合の影響を検した。その結果は第 23 圖の如くである。本實驗に於ては



第 22 圖 屈曲後油中焼入せる場合の狀態

(Ni-Cr-Mo 鋼) (約 1/2 縮寫)

(1) 屈曲直後焼入 (×70) (2) 屈曲 5 秒後焼入 (×70) (3) 屈曲 30 秒後焼入 (×70)



第 23 圖 屈曲途中焼過焼鈍せる場合の狀態
(0.4% 炭素鋼) ×150 (約 1/1.5 縮寫)
(1) 焼鈍せざる場合 (2) 焼鈍せる場合

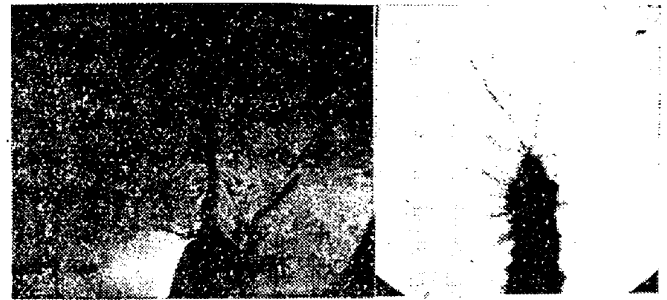
屈曲を三段に行い、各段階毎の軟化條件は 800°C、保持時間 10 分材料は 0.4%炭素鋼、軟化後は各々規準屈曲温度 1000°C に戻して屈曲したものである。即ち結果は第 23 圖に明かなる如く、軟化しつつ屈曲することにより疵の發生は完全に防止され得ることがわかる。この實驗に於て各回の Scaling により除去される表面層の厚みと、發生する疵の深さとの關係如何は注意を要するが、實際上 800°C 附近の少時間に於て生ずる、スケール層の厚みは微少なる故、これにより疵が除去されることは無いものと考えられる。たとえこれありとしても少くとも最終回の壓縮に於ては屈曲後の加熱を行はぬにより疵を残すべき筈であるが圖に明かなる如く疵發生を見ないことは軟化による影響と見るべきである。即ちこの實驗によるも屈曲部の加工硬化が疵發生に直接影響を及ぼしていることがわかる。屈曲部の加工硬化がどの程度かに就ては測定困難であるが、硬化の事實は該部に於ける結晶粒の纖維狀變形狀態より察知出来ると思う。

IV. 屈曲内面疵の發生原因とその疵形成機構の考察

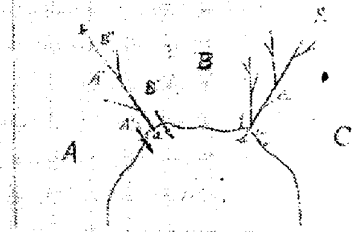
以上諸多の實驗結果よりこれを考察するに、この疵の正體は結局材料破壊の終局的現象である破斷であると斷定される。即ち單なる粘性變形による周邊部の疊込によ

つて形成されたものとは考えられない。このことは上記實驗に於いて種々なる屈曲方法によつて生ずる疵の長さの消長が大體材料力學的原則に合理的變化をなすことから考えられる。従つてこの疵の直接の原因は屈曲部の内側面に於ける壓縮應力の集中とそれによる局部的加工硬化にあると考えられる。

次に屈曲内面疵の形成機構に就て考察すれば、第 24 圖に於て (1) は鋼を常溫に於て曲げた場合の代表的屈曲



(3) 樹枝狀疵の形成機構説明圖



第 24 圖 屈曲内面疵の代表的形狀とその形成機構説明要圖 (約 1/1.7 縮寫)

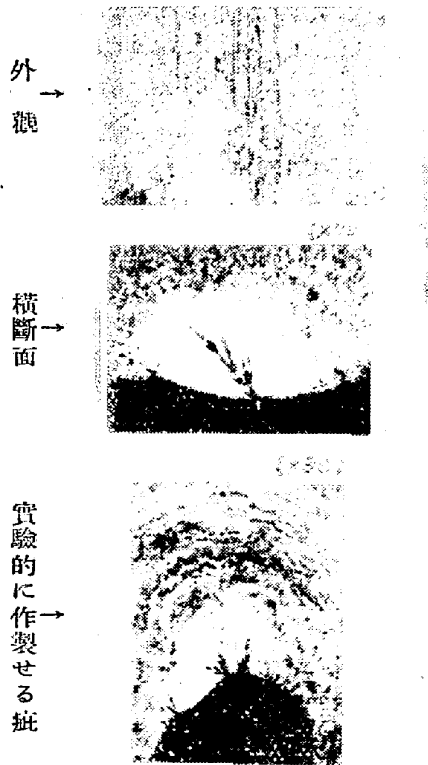
- (1) 常溫に於ける疵の代表的形狀
- (2) 高溫に於ける疵の代表的形狀 (×70)

内面疵で (2) は約 1000°C に於いて發生せる代表的疵の形狀である。疵の發生位置、方向等は大體これらを以て代表し得るが、鋼質或は屈曲時の温度其他の條件によつて多少の差異はある。比較的靱性の大なるものは (1) の中央に於ける疵は輕度になり、高温の場合は (2) の如く壓縮方向に對して略 45 度に近き角度の斜方向の疵が主體となる。その形狀は概して樹枝狀となることは本圖によるも明かであらう。何故樹枝狀になるかについて著者は次の如く考察する。第 24 圖 (3) に於て鋼は屈曲度の進むに従つて屈曲部の内側の曲率が漸次減少する故當然この部分に最大の應力が集中する筈で、その結果粘性變形によつて、はじめ鋼の周邊は凹凸となり皺を形成するがこの皺は引續いて起る加工硬化現象によつて或る限度以上には深まらずに、それ以上の應力が加われば逆に破れを生じ、亡り易からしめてこの過剩應力に對處する。今破れ疵發生の初期段階に於て圖の如く a-b, b-c

の二本の疵を生じたとする。然るときは材料はA, B, Cの三部に分斷されたことになる。しかし a-b 疵の場合に就て言えばA及びB部分は矢の如く抵抗の少い空間部の方向に疵に添うて流動するであらう。而して迂りの難易は内部よりも外部が迂り易き故、どこかに迂り速度の遅速を生ずれば破れ疵の發端となるべきである。この破れの發端は言うまでもなく疵 a-b に添うた部分より起るべきであるから、こゝに第二の破れ疵を生じて先づ第一枝を形成する。結局A部についてはA'A'', B部についてはB'B''等の小部分に分斷される。即ち斯の如き機構が壓力の加はるに従つて繰返され、更に第三第四の小枝を發生して樹枝狀の形態をなすものとする。即ち屈曲内面疵は形態上よりもかくの如く考察することによつてよく説明し得るが、これを單なる皺の疊込み、或は周邊の入り込みによるものと見る場合は到底解明出来ない。このことは又主要疵が略壓縮方向に對し45度に近い進入方向をとる點より考へても剪斷面に起る破れと見ることが出来るであらう。これを要するに屈曲内面疵は材料の破壊現象に於ける破斷による疵で單なる機械的に形成された周邊部の疊込でないと斷定する。

V. 屈曲内面疵の製品に發生せる實例とその有害性

第25圖は屈曲内面疵が製品に發生せる實例を示せる

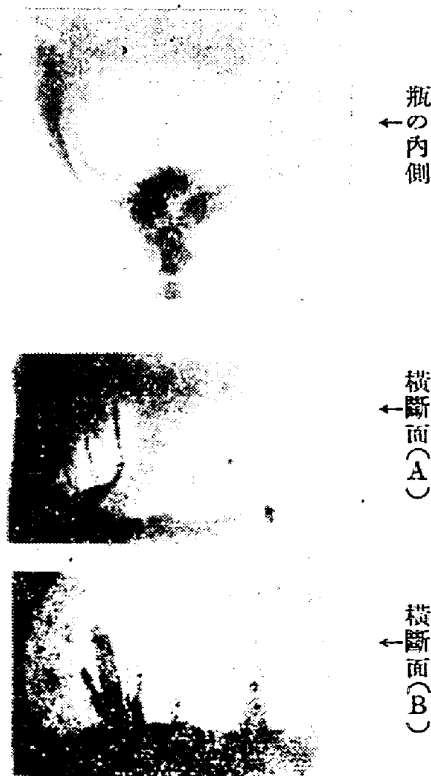


ものである。(1)は特殊鋼の歴延せる18mm丸棒に發生せるものゝ外觀で、この疵の主體は屈曲内面疵である。主として孔型ロールによる歴延の際に往々發生する噴出し、角隅等の壓縮によつて發生する。この種の疵の存在する部分には歴々單なる折込疵も混ざることがあるが折込疵は多くは連続的になるが屈曲内面疵によるものは短小なる不連続的である。屈曲内面疵はこのほか鋼管や平板等の深絞り加工等の際にもその内側に往々發生する又鋼管や棒材等の引抜加工の際に口絞り加工部にこの種の疵を残していることが認められる。同圖(2)は瓦斯容器口部内側に多數發生せる實例である。

この疵の有害度は加工方法、熱處理狀況或は取扱方法等によつて一概に言えないが、鋳材等の頭部形成加工の際には口開け疵となり易く、自硬性特殊鋼の空冷の際或はその他の鋼の焼入處理等の際に焼割れの主因となり易いことは前述焼入實驗の結果よりも明かであらう。又かくの疵は密集状態となつて發生することが多い故局部的腐蝕を促進し易く、耐蝕性を損ずるし、廻轉シャフトの如きはこの疵により疲勞破損の起點となる可能性が強いであらう。かくの如くこの疵の有害性は決して輕少でなく、相當廣汎に亘つて悪影響を來すものと考えられる。

VI. 總括

以上研究結果を要約すれば次の如くである。



第25圖 屈曲内面疵の製品に發生せる實例
(1) 歴延棒鋼(13mmφ)(Ni-Cr-Mo鋼) (2) 瓦斯容器口絞部の内側(炭素鋼)

1) 屈曲内面疵は純鐵, 炭素鋼, 強靱特殊鋼, 耐熱鋼, 肌焼鋼等 11 種に及ぶ鋼について實驗せる結果いづれにも發生する故殆どあらゆる鋼に發生するものと考えられる。

2) この疵に及ぼす鋼種の影響を見るため 11 鋼種について二三の屈曲角度毎に疵の長さを比較して見るに, 各屈曲角度毎の長さの順位は略鋼種によつて定まる, 即ち鋼種による影響が認められた。

3) 輪狀試験片の内徑を一定にとり厚みを種々に變えて壓縮すると厚みの厚いもの程疵の深さを増す。こゝに厚みの差は壓縮應力の差と考え得る故, この疵は結局は壓縮應力の大小に比例することがわかる。

4) 屈曲角度による影響を知るため種々なる屈曲度 (壓縮度) に於ける疵發生状況を見るに餘り緩い屈曲角度にては疵を見ないが, ある程度以上となり屈曲部の内側に於ける曲率半徑が減少する程疵の深さを増す。實驗せる輪狀試験片について言えば曲率半徑が大體 4mm 程度から疵が見え, 2mm 程度より疵の深さが急に増して内邊が接觸し, 密着するに至れば餘り増さない。即ちこれ以上の壓縮に於ては單に材料全體の伸と同一割合を以て疵が伸長されるに過ぎない。これより考えてこの疵は屈曲内側の曲率半徑の縮小, 凹凸による Notch effect 等により異常なる應力集中作用が原因して發生するものと考えられる。

5) 同一壓縮度迄の槌打回数の影響は回数を多くする程發生疵の深さは淺くなる傾向が認められる。

6) 屈曲時の屈曲速度の影響を見るため, 試験片を靜的或は動的に壓縮せるに靜的に遅い速度で屈曲せるものは疵が幾分淺く現はれる。即ち速度の影響が認められる。

7) 温度の影響については常溫より 1000°C 迄各温度について實驗せる結果, これを概言すれば高温程疵は短小となる傾向がある。但しこの關係は鋼種によつて必ずしも一定でない。又一般的には 400°C 内外即ち所謂青熱脆性範圍とか或は低炭素鋼等にありては 700°C, 900°C 等に不連續的な部分がある。この温度と各温度に於ける機械的性質とを比較するに最も類似關係を有するものは伸率であるようである。

8) 加熱時間の影響を見るため最長 10 時間迄瓦斯爐中で長時間加熱せる試験片を一旦常溫迄冷却せる後更に全試料を 1100°C 迄加熱し 1000°C に於て壓縮して疵の長短を見るに長時間加熱せるもの程疵が深くなつた。これは鋼の種類によつても例外はあらうが, 一般に長時間加熱せる場合は結晶粒の成長を除外しても鋼表面に於ける酸素進入, Cu の濃度上昇其他による表面の脆性が考え得る故疵が長く現はれることは當然であらう。

9) 結晶粒度との關係は 18-8 系 Cr-Ni 不銹鋼, 即ちオーステナイト鋼について實驗せる結果にては結晶粒の大なるもの程疵が深く現はれた。よつてこれは一般鋼種についても同様の關係があるものと思せられる。

10) 真空中に於ける屈曲によつて發生する疵は空氣中に於けるものと形狀に於て殆ど變つていない。たゞ酸化脱炭が殆ど見られないだけである。

11) 屈曲を一回に行はず, これを二三の段階に分けて行い, 各段階毎に焼鈍して屈曲部に於ける加工硬化を防止する時は疵の發生を見ない。即ちこの結果により集中應力による加工硬化は破れ疵を生ずる最も直接的な原因と考へられる。

12) 鋼の表面に電氣鍍金其他の金屬の被覆層を作つて, そのまゝ屈曲すると被覆層が薄い場合には疵は鋼迄達するが, これを充分厚くすると疵は被覆層内だけにとゞまり鋼に達しない。被覆層が金屬以外のものは單に疵の部分の酸化等を幾分妨げるのみで疵の形狀及び發生状態には殆ど變化がない。即ちこの疵の發生は表面的現象で屈曲部の内側が遊離状態にあることが必要條件であると言える。

13) 疵を發生せしめた試験片は焼入硬化鋼については疵の部分より容易に燒割を發生することが認められた。即ちこの疵は燒割の誘因となる可能性が強い。

14) 屈曲内面疵の代表的形態は樹枝狀であるが, この形成機構について考察した。

15) 屈曲内面疵の實際製品に於ける發生状況及びその有害性につきて述べた。

VII. 結 論

鋼を折り曲げる場合にその内側に發生する一種の疵は従來考えられたような鋼の周邊の入込み或は皺の疊込み等單に粘性變形により機械的に形成されたものではなく鋼自體の局部的破斷が疵の主體であると斷ずる。而してその原因は屈曲部の内側に於ける集中應力により局部的に極度の加工を受け硬化し, 逆に壓縮應力の過剰に耐え得ぬ段階に達し破れ疵を形成せるものと考え。實驗の結果疵の深さの消長は大體材料力學的原則に従つておるが, 又温度, 結晶粒度, 鋼の表層に於ける材質等も相當影響することが知られた。(昭. 24. 6 月寄稿)

參 照 文 獻

- 1) 高島徳三郎: 「鐵と鋼」誌第 29 年, 第 10-11 號 13-25 頁 (昭和 18 年 10 月)
- 2) H. Cramer: 「Stahl und Eisen」25 Juli, 1935
- 3) W. Trinks: "Supplement to Roll pass Design" 1937
- 4) 堀岡米吉: 「鍛練鍛造」上下卷