

鋼の分離抗力と焼戻脆性

(日本鉄鋼協會第 27 回講演大會講演 昭 17. 4. 於東京)

河合正吉*・越智通夫*

DIE TRENNFESTIGKEIT UND DIE ANLASSPROEDIGKEIT DES STAHLSES.

Masayosi Kawai und Mitio Oti.

ZUSAMMENFASSUNG:— Beim Zugversuch stellt der anlasspröde Stahlwerkstoff den fast gleiche Ergebnis mit dem von Anlassprödigkeit freien auf. So ist es sehr nahe, dass der Unterschied in der Kerbschlagzähigkeit der beiden Werkstoffe nicht auf ungleiche Schubfestigkeit zurückzuführen ist, die in enger Beziehung mit der dem Zugversuch entsprechenden Eigenschaften, die Streckgrenze, die Bruchfestigkeit, die Dehnung und die Einschnürung, steht. Man kann daher erwarten, dass der Unterschied der Trennfestigkeit darüber die Erklärung geben mag. Die Verfasser versuchten nach W. Kuntze den Kerbzugversuch über einige Werkstoffpaar, und haben nur das fast negative Resultat gewonnen. Entscheidend mit der über die Spannungsverteilung des Kerbgrundes durchgeführten Berechnung, kann man erkennen, dass die nach der Kuntzschen Methode erhaltene Kerbfestigkeit nichts anders als die mehr oder weniger plastische Verformung begleitende Trennfestigkeit ist. Gerade auf diese plastische Verformung ist die kleine Unterschied in der Kerbschlagzähigkeit zurückzuführen. Durch den Kerbbiegeversuch und den ergänzende Versuch über die Kaltverformungseffekt ist es klagemacht dass die Trennfestigkeit des anlasspröden Werkstoffes kleiner als die des von Anlassprödigkeit freien im normalen Zustand ist und auch dieser Unterschied durch die Druckverformung abnimmt. Weiter beobachteten die Verfasser die Kaltprödigkeit und zeigten, dass die Analogie zwischen die Kalt- und Anlassprödigkeit besteht.

I. 緒 言

鋼の機械的性質の判定の一として切欠衝撃試験が採用されて居るが、鋼製品の實地使用状態に於ける安全性と衝撃値とが如何なる関係を有するかを明確ならしめる事は鋼の製造上にも、使用上にも肝要な事である。この爲には先づ一般に機械的性質を左右する基本量と衝撃値との関係を明らかにする事が必要である。鋼の機械的性質を支配する基本量としては滑り抗力と分離抗力¹⁾とが挙げられるが、切欠衝撃試験の際の試験片の破壊は滑りを伴ふ分離破壊であり、随つて衝撃値も滑り抗力と分離抗力とに支配されるものと思惟される。

焼戻に依て脆化を起せる鋼は然らざる鋼に比して抗張力は略等しく衝撃値が異ると言ふ點で衝撃値を論ずる對象として好適の材料と考へられる。焼戻脆化を起せる鋼は然らざる鋼に比して抗張力のみならず降伏點、延伸率、收縮率及硬度等に就いても殆ど差異の認められない事は周知の事實であり、これ等の諸量は滑り抗力と密接な關係にあるもので、随つて滑り抗力に関しては焼戻脆化を起せるものと起

さざるものとの間に殆ど差異が無いものと判断せられる。

依つて著者等は兩者の差が分離抗力の相違に依つて起るものと想像し、焼戻脆性と分離抗力との關係に就き検討し更に焼戻脆性と低温脆性との類似性に言及した。

II. 焼戻脆性と衝撃速度

焼戻脆性の問題を取扱ふに當り先づ衝撃速度の影響を調査した。即ちシャルピー式衝撃試験機を用ひ、其の振り錘の振上角度を變へる事に依り試験片を打つ瞬間の速度を變へて實驗を行つた。尙極限の場合として靜的屈曲試験の際の吸収エネルギーをも求めて比較した。

この實驗に供した試料の化學組成を第 1 表に、其の熱處理及機械的性質を第 2 表に掲げる、試験片は何れも 10mm

第 1 表			
試料符號	C %	Ni %	Cr %
A	0.39	3.00	0.93
B	0.25	4.31	1.06

第 2 表						
試料符號	熱處理	抗張力 kg/mm ²	降伏點 kg/mm ²	延伸率 %	收縮率 %	硬度 B. H. N.
AX	850°O.Q., 600°F.C.	75.2	65.5	15.6	53.0	285
AY	850°O.Q., 600°O.C.	75.5	65.0	15.4	55.6	285
BX	850°O.Q., 600°F.C.	76.5	66.5	15.8	53.0	285
BY	850°O.Q., 600°O.C.	74.3	65.0	15.0	54.2	285

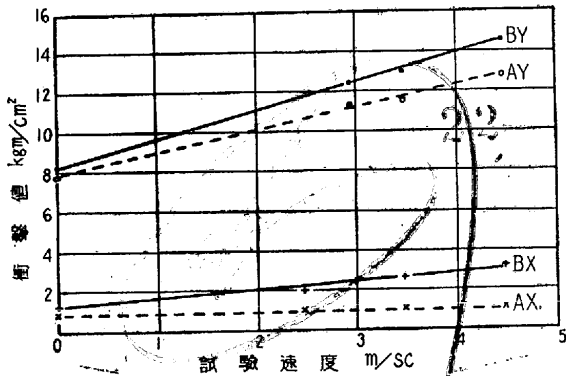
* 三菱重製鋼株式會社長崎製鋼所

¹⁾ 塑性變形度と共に變化する。

角アイソット型試験片を用ひ、静的屈曲の場合も衝撃試験の場合と同様に兩支點間の距離を 40 mm とした。試験結果は第1圖の通りで、焼戻脆性の特徴は試験速度に係らず静的屈曲の場合にも鋭敏に現れてゐる。尙寫眞第 1, 第 2

にそれぞれ試料 A, B の破面の狀況を示したが静的試験の場合と衝撃試験の場合とで何等差異は認められない。これ等の事實に依り、焼戻脆性は衝撃速度の問題ではなく、切欠屈曲の問題に歸着すべきものと言ふ事が出来る。依て以下主として静的試験を基礎として検討を行ふ事とする。

第2圖は上述の屈曲試験に依り求めた屈曲荷重曲線の 1 例を示すもので、焼戻脆化を起せるものは切欠底部に龜裂が発生するや、直ちに荷重の激減を來たし、急激に破斷するが、それ以前は焼戻脆化を起さざるものに比して著しい差異は無い。第3表は最高荷重及最高荷重迄の撓みを各試料毎に平均したもので、脆化を起さざるものの方が稍大なるは切欠底部に龜裂の發生後も暫くは撓みの増加に伴ひ加工硬化の爲荷重の増加を來す事に依るものである。



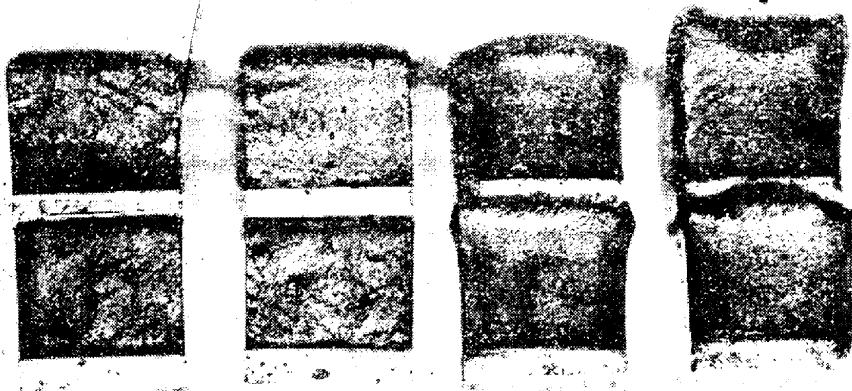
第1圖 衝撃速度と焼戻脆性

上段静的,

下段衝撃,

右半 AX,

左半 AY



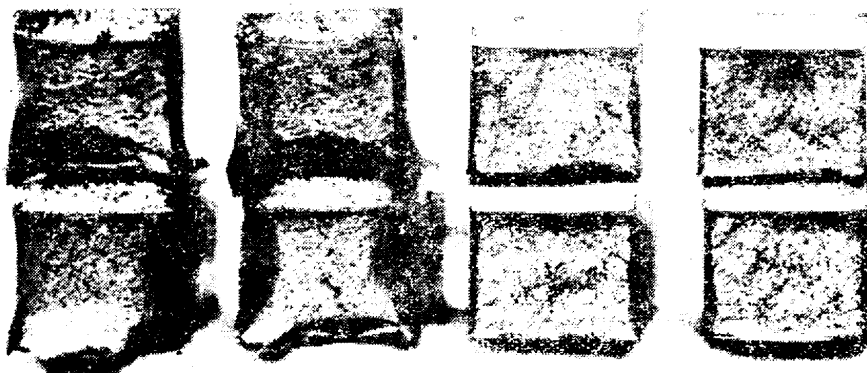
寫眞第1 試料 A の破面

上段静的,

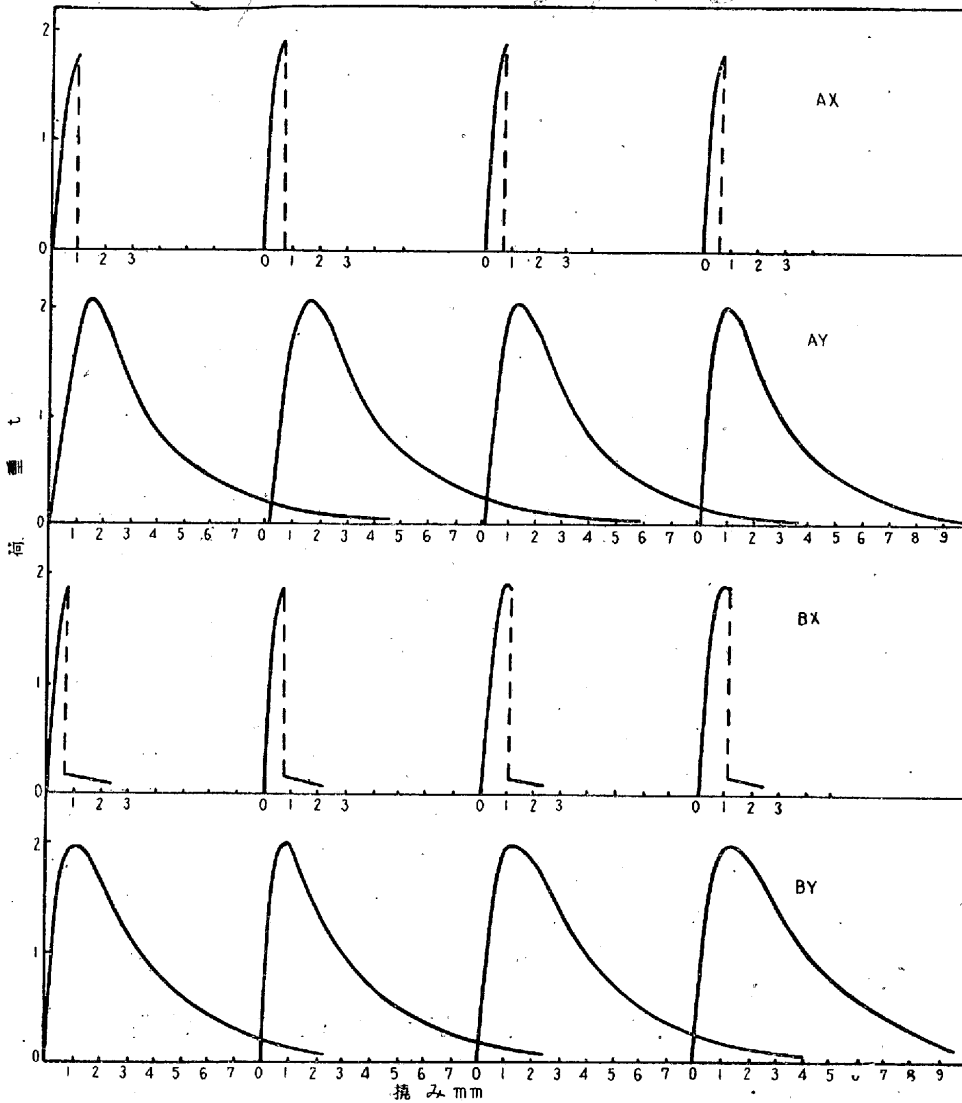
下段衝撃,

右半 BX,

左半 BY



寫眞第2 試料 B の破面



第2圖 切欠屈曲試験に於ける屈曲荷重曲線

第3表 切欠屈曲試験に於ける最高荷重及其迄の撓み

試料符號	最高荷重	最高荷重迄の撓み
A X	1.98 t	0.76 mm
A Y	2.05	1.23
B X	1.97	0.88
B Y	2.03	1.27

III. 分離抗力, 滑り抗力と焼戻脆性

焼戻に依つて脆化を起せるものと、然らざるものとの分

第4表

試料符號	C %	Ni %	Cr %
C	0.33	3.50	0.60
D	0.33	2.51	0.64

第5表

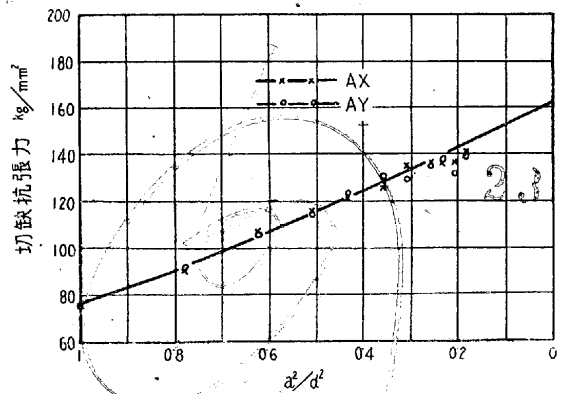
試料符號	熱處理	抗張力 kg/mm ²	降伏點 kg/mm ²	延伸率 %	收縮率 %	アイゾット 衝撃値 kgm/cm ²
CX	850°O.Q., 600°F.C.	92.3	82.1	21.0	62.8	3.7
CY	850°O.Q., 600°O.C.	94.3	83.7	20.3	64.0	9.9
DX	850°O.Q., 600°F.C.	96.7	81.1	24.2	54.9	—
DY	850°O.Q., 600°O.C.	93.5	—	25.0	65.7	—

分離抗力及滑り抗力を調査する爲に、以下の如き実験を行つた。

試料は第1表に掲げたものゝ外に、第4表に示す組成のものを使用した。その熱處理及機械的性質は第5表の通りである。

分離抗力の測定には現在の所完全な方法は無いが、最も普通に行はれてゐる W. Kuntze の切欠試験法に²⁾依る事とし、試験片の寸法は試料 A, B では切欠最小断面部の半径 $a=3\text{mm}$ 、試料 C では $a=2.5\text{mm}$ に一定して平行部の半径 d を變へ、試料 D では $d=10\text{mm}$ として a を變へた。各試料共切欠底部の曲率半径 $\rho=0.1\text{mm}$ とし、切欠角度 α は A, B, C では $\alpha=60^\circ$ 、試料 D では $\alpha=45^\circ$ とした。實驗の結果を第3~7圖に掲げる。

第5圖、第6圖に於ける C' なる試料は試料 C と成分、熱處理共に同一であるが $15\text{mm}\phi$ のものを豫め最高荷重に相當する

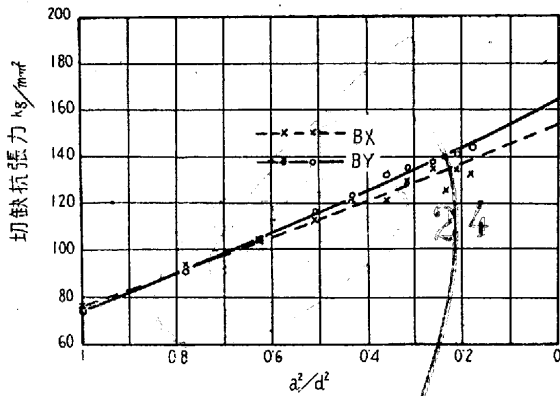


第3圖 試料 A の切欠抗張試験

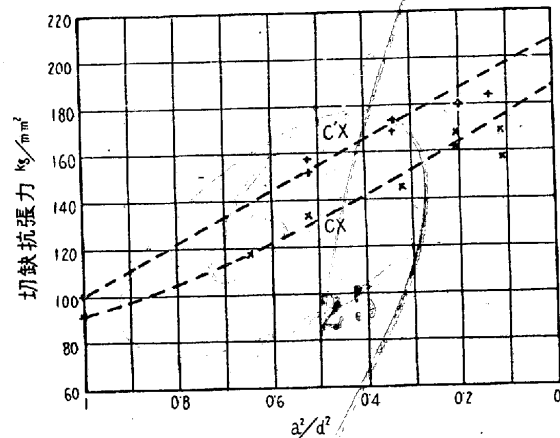
張力で引張り、塑性變形を與へた後、試料 C と同様の試験片に仕上げて實驗したものである。

上圖より求めた分離抗力を第6表に示す。焼戻脆化を起したものとの方が稍低いものもあるが、總じて著しい差異は

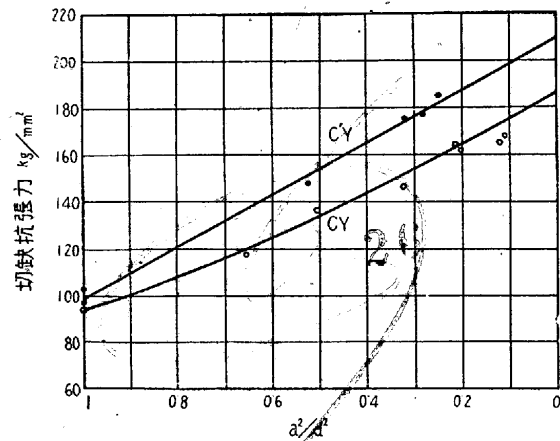
²⁾ W. Kuntzer; Zeits. Phys., 74, (1934) 45



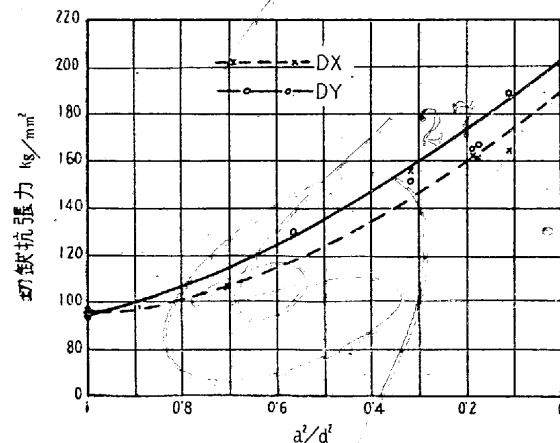
第4圖 試料Bの切欠抗張試験



第5圖 試料Cの切欠抗張試験(1)



第6圖 試料Cの切欠抗張試験(2)



第7圖 試料Dの切欠抗張試験

無い。又塑性變形に依る分離抗力上昇の程度にも、殆ど差異は無い。

第6表 Kuntze 法に依て求めた分離抗力

試料	A	B	C	C'	D
	kg/mm ²	kg/mm ²	kg/mm ²	kg/mm ²	kg/mm ²
X	162	154	188	208	191
Y	162	163	188	210	202

次に滑り抗力 τ_p は降伏点 σ_y より

$$\tau_p = 1/2 \cdot \sigma_y$$

に依つて求められ第7表の如くなる。試料 A', B' は夫々試料 A, B の最高荷重まで塑性變形を與へたものである。同表に依れば、滑り抗力も焼戻脆化を起せるものと起さざるものとの間に差異は認められない。又塑性變形に依る上昇の程度にも殆ど差異は無い。

第7表 降伏点より求めた滑り抗力

試料	A	B	C	A'	B'
	kg/mm ²	kg/mm ²	kg/mm ²	kg/mm ²	kg/mm ²
X	33	33	41	43	44
Y	33	33	42	43	43

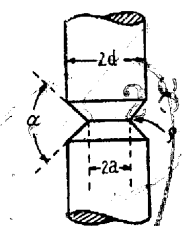
かくの如く上述の方法に依つて求めた分離抗力、滑り抗力共に殆ど差異が無いにも拘らず、第2圖の如く龜裂發生後は著しい相違を生じ、衝撃値の低下甚だしくなるのである。この原因を探求する爲、Kuntze の方法に就き検討を行ふ事とする。

IV. W. Kuntze の方法の吟味

Kuntze の分離抗力測定法に於ては、前項の實驗に於ても行つた通り、第8圖に示した如き α, ρ 夫々一定の試験片を用ひ、 a 又は d の何れか一方を一定にして $(a/d)^2$ を

零に收斂せしめた場合の切欠抗張力の極限值を以て分離抗力とするのであるが、弾性論と立場から此の極限值の意等を吟味する事とする。

先づ a を一定にした場合に就て論ずる。便宜上切欠は双曲線型とし、 $d = \infty$ 切欠抗張力試験片、軸方向に荷重で P 引張られた状態を考へる。切欠に依る最小断面部の作る圓の中心を原點とし軸方向を x 軸とする直角座標系 (a, y, z) に對しなる關係



第8圖

$$\left. \begin{aligned} x &= \sinh u \cos w \\ y &= \cosh u \sin v \cos w \\ z &= \cos h u \sin v \sin w \end{aligned} \right\} (1)$$

にある u, v, w を座標成分とする直交曲線座標系を採る事とする。式(1)は u 一定のとき v 軸を回轉軸とする回轉楕圓體を、 v 一定のとき x 軸を回轉軸とする回轉双曲面

を、 v 一定のとき x 軸を含む平面を表す。

今切欠面を $v=v_0$ 、ポアソン比を $1/m$ とすれば

法線応力 $\sigma_u, \sigma_v, \sigma_w$ は夫々

$$\sigma_u = (1/h^2) \{ A \tanh^2 u + B \cos v / \cosh^2 u + C(-4 + 2/m + 1/\cosh^2 u) \cos v \} + \cos(v/h^4) \{ -A + B + C \cos^2 v \} \dots (2)$$

$$\sigma_v = (1/h^2) \{ -A \cos v / (1 + \cos v) + (1 - 2/m) C \cos v \} + (\cos v)/h^4 \cdot \{ A - B - C \cos^2 v \} \dots (3)$$

$$\sigma_w = (1/h^2) \{ A[-\tanh^2 u + \cos v / (1 + \cos v)] - B \cdot \cos v / \cosh^2 u + C(1 - 2/m - 1/\cosh^2 u) \cdot \cos v \} \dots (4)$$

切線応力 $\tau_{uv}, \tau_{vw}, \tau_{uw}$ は夫々

$$\tau_{uv} = (1/h^2) \tan u \sin v \{ -A/(1 + \cos v) + (1 - 2/m)C + (1/h^2)(-A + B + C \cos^2 v) \} \dots (5)$$

$$\tau_{vw} = \tau_{uw} = 0$$

となる。³⁾ 茲に

$$\left. \begin{aligned} h &= (\sinh^2 u + \cos^2 v)^{1/2} \\ A &= (1 - 2/m)(1 + \cos v_0)C \\ B &= A - C \cos^2 v_0 \\ C &= (-p/2)(1 + \cos v_0) / (1 + 1/m \cdot \cos v_0 + \cos^2 v_0) \\ p &= P/\pi a^2 \end{aligned} \right\} \dots (6)$$

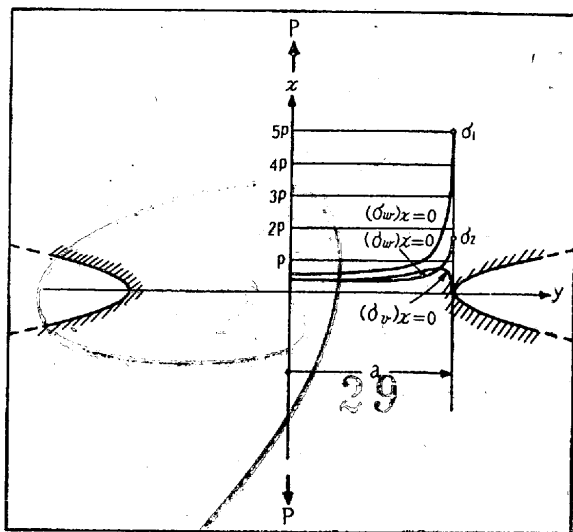
切欠最小断面部では $u=0$ なる故式 (5) より

$$(\tau_{uv})_{x=0} = \tau_{vw} = \tau_{uw} = 0$$

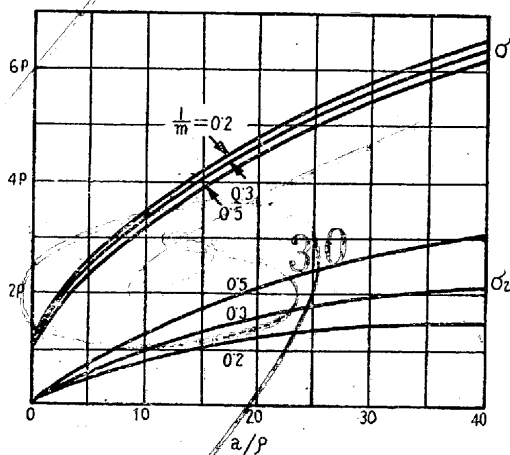
となり、随つて $(\sigma_u)_{x=0}, (\sigma_v)_{x=0}, (\sigma_w)_{x=0}$ は主応力を表し、此等は式(2), (3), (4) 及 (6) に於て $u=0$ と置いて求められる。一例として $1/m=0.3, \cos v_0=0.2$ の場合の最小断面部の応力の分布状態を示せば第9圖の通りである。この場合切欠を表す双曲線の漸近線のなす角は約 23° で、以下此の漸近線の角度を切欠の角度と呼ぶ事とする。

第10圖は切欠底部の応力 $\sigma_1 = (\sigma_u)_{x=0}^{\nu=v_0}, \sigma_2 = (\sigma_w)_{x=0}^{\nu=v_0}$ と $a/\rho = \tan^2 v_0$ の関係を示したもので a/ρ が大となる程即ち切欠が鋭くなる程 σ_1, σ_2 は大となる。

$(\sigma_v)_{x=0}$ は第9圖に於ても見られる如く軸と切欠底との間で極大が存在するが此の極大値 $(\sigma_v)_{x=0} \max$ と $\cos v_0$ との関係を求めれば第11圖の如くになり⁴⁾、 $\cos v_0$ が小となる程即ち切欠の角度が大となる程 $(\sigma_v)_{x=0} \max$ は小となり、その位置も第12圖の如く切欠の角度が大となるに伴



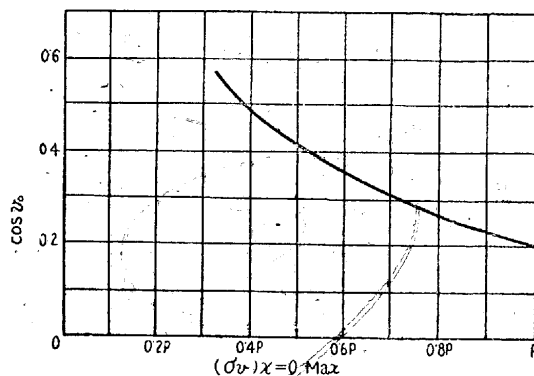
第9圖 $\cos v_0=0.2$ の場合の最小断面部の応力 ($1/m=0.3$)
[上の $(\sigma_w)_{x=0}$ は $(\sigma_u)_{x=0}$ の誤、下の $(\sigma_w)_{x=0}$ はその儘]



第10圖 a/ρ と σ_1, σ_2 との関係

ひ中心に近づき、 $\cos v_0=0.58$ 即ち約 70° のとき中心に一致する。

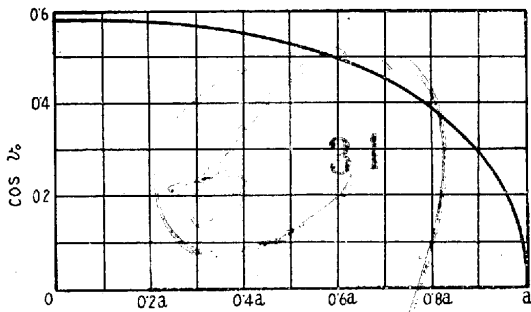
尚 $(\sigma_v)_{x=0}$ と $(\sigma_w)_{x=0}$ との等しい位置を求めれば $1/m=0.5$ の場合には $\cos v_0$ の値に関せず常に中心に在るが、 $1/m=0.3$ の場合には第13圖の通り $\cos v_0$ が大となるに随ひ中心に移動し、 $\cos v_0=0.36$ 即ち 43° 近くで中心に一致する。一般に $(\sigma_v)_{x=0} \max$ の位置は $(\sigma_v)_{x=0} = (\sigma_w)_{x=0}$ の位置



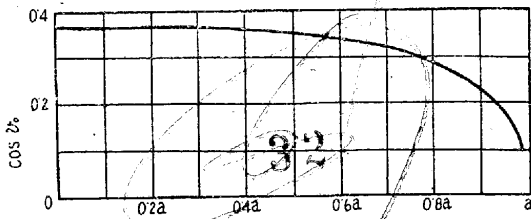
第11圖 $\cos v_0$ と $(\sigma_v)_{x=0} \max$ との関係 ($1/m=0.5$)

³⁾ H. Neuber: Kerbspannungslehre, 1937

⁴⁾ $1/m=0.5$ の場合を示す。



第12圖 $\cos v_0$ に対する $(\sigma_v)_{x=0} = 0 \text{ max}$ の位置 ($1/m=0.5$)



第13圖 $\cos v_0$ に対する $(\sigma_u)_{x=0} = (\sigma_w)_{x=0}$ の位置 ($1/m=0.3$)

より常に外側にある。

$(\sigma_v)_{x=0} = (\sigma_w)_{x=0}$ の位置より外部に於ては

$$(\sigma_u)_{x=0} > (\sigma_w)_{x=0} > (\sigma_v)_{x=0}$$

なる故、最大剪断應力説に従へば

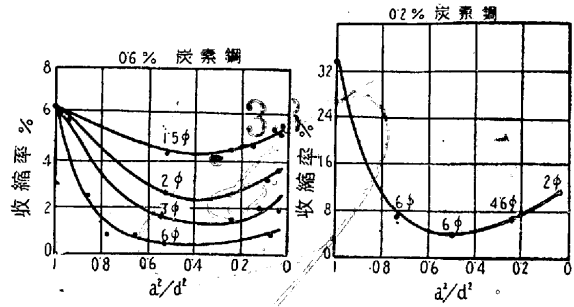
$$\tau = (\sigma_u)_{x=0} - (\sigma_v)_{x=0}$$

が此の部分に於ける塑性變形の難易を支配するが、 τ は $(\sigma_v)_{x=0} \text{ max}$ の位置を界として、それより外部では急に大となる故、 $(\sigma_v)_{x=0} \text{ max}$ の位置より外部では塑性變形が起り易い。而して $(\sigma_v)_{x=0} \text{ max}$ の位置は第11圖に示した如く、切欠の角度が大となるに伴ひ中心に向つて移動する故、切欠の角度が大となる程破断が起るまでに塑性變形を行ふ部分が増加する。逆に切欠が鋭くなれば第9圖、第10圖の通り應力の集中度が大となり、塑性變形を爲し得る部分も減少する故、破断時の應力分布の不均一度が大となる。

次に d を一定にして a を無限小にした場合も、 a を一定にして d を ∞ にした場合と同様の事が言はれる事は明かである。

さて切欠底部の曲率半径 ρ が一定の場合、切欠部の直径 $2a$ が小なる程 a/ρ は小となり切欠の効果は減少して塑性變形が容易となる。第14圖は $\alpha = 60^\circ$ の場合の例で径が小なる程變形が大である。

かくして Kuntze の方法に依つて求める分離抗力は多少の塑性變形を伴つた場合の破断抗力を示すものであつて、變形度は同一材質のものに於ても切欠角度、切欠底部の曲率半径、切欠部の径に依つて異なる事が結論される。

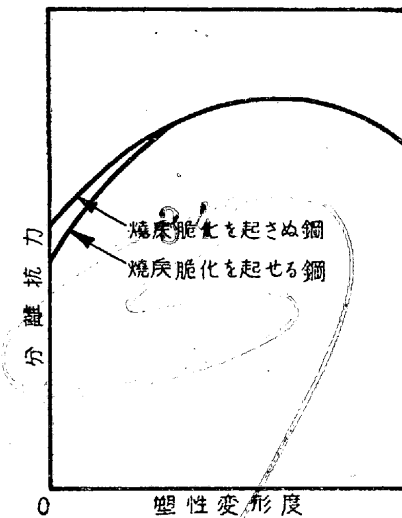


第14圖 切欠抗張試験に於ける収縮率

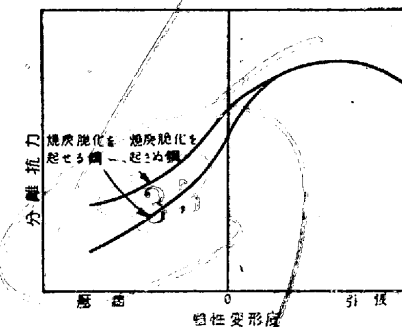
V. 低温加工と焼戻脆性

前項に於て述べた如く切欠が鋭い程、切欠底部附近の變形は困難となり、墮つて切欠屈曲破壊の場合にも、龜裂が発生する迄は切欠底部は相當變形して分離するが、龜裂発生後は龜裂底部は變形が極めて困難の爲、應力は容易に上昇する。

焼戻脆化を起せるものが龜裂発生後急激に破断する事より、塑性變形を起さざる場合の分離抗力は第15圖の如く焼戻脆化を起さざるものに比して幾分⁵⁾低いものと推定される。



第15圖 塑性變形に依る分離抗力の變化 (其の1)



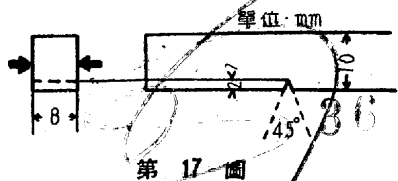
第16圖 塑性變形に依る分離抗力の變化 (其の2)

Kuntze の方法に依つて求めた分離抗力にこれが現はれ難いのは、切欠部に起る塑性變形の結果この差が消失する爲と思惟される。尙分離抗力が或る範圍の引張變形に依つて上昇し、壓縮變形に依つて低下する事を考慮して第15圖の關係を壓縮變形に對して外挿すれば第16圖の如く焼戻脆化を起せるものと起さざるものとの分離抗力の差が一層大となる。

以上の考察に對する實驗として焼戻脆性に對する低温加工

⁵⁾ 次項参照

の影響を調べた。試料は分離抗力の測定に於て殆ど差異の



第 17 圖

現はれなかつた試料

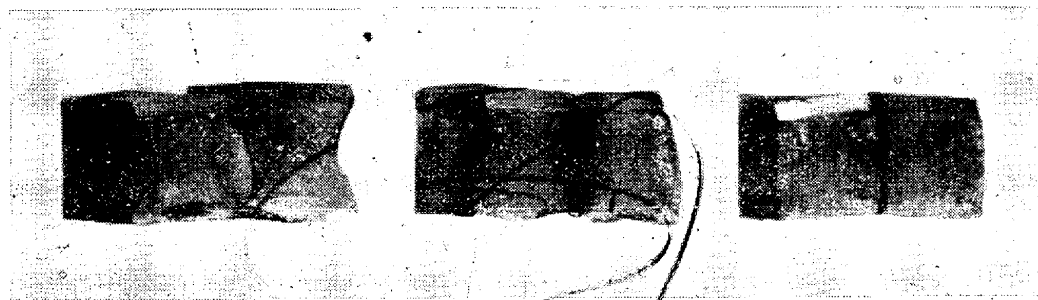
C を用ひ、熱処理後

豫め矢の方向 (第 17

圖) に常温に於て 20

% 壓縮加工を施し、圖の如き形状の切欠衝撃試験片に仕上げて實驗を行つた。

寫眞第 3 は衝撃試験に依る破面で、左端及中央は焼戻脆化を起さざるもの、右端は起せるもので、脆化を起せるものは衝撃試験の結果、壓縮方向に直角に多數の龜裂を生じて居るが、脆化を起さざるものには此の龜裂が少い。これは焼戻脆化を起せる鋼の壓縮方向の分離抗力の低下の著しい事を実證してゐるものである。



寫眞第 3 低温加工を施せる試料 C の衝撃試験破面

VI. 低温脆性の機構

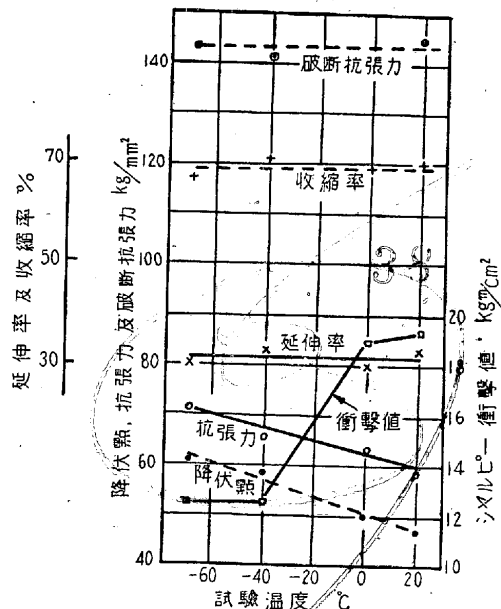
滑り抗力、分離抗力と衝撃値の問題に關聯して低温脆性に就て簡単に述べる事とする。低温に於ける鋼の機械的性質の特性として一般に衝撃値の低下、降伏點及抗張力の上昇等が擧げられるが、こゝに注目すべき事柄は抗張力の上昇の割合が降伏點の其れに比較して小なる事及延伸率、收縮率、破斷抗張力が極度の低温の場合を除いては殆ど變らないと言ふ事である。第 18 圖は其の 1 例として低炭素クロム鋼に就ての實驗結果を示したものであるが、此の事は滑り抗力、分離抗力が第 19 圖に示す如き關係に在る事を物語るものである。即ち低温に於ては滑り抗力が、上昇するが、常温の場合との差は塑性變形の進行と共に減少する事である。之を第 20 圖の焼戻脆性の場合のものと對照すれば低温脆性は滑り變形の相違に依り、焼戻脆性は分離抗力の相違に依つて起り、此等の差異が共に塑性變形度に伴ひ減少する事に類似性が認められ

低温加工に依る衝撃値の變化は第 8 表の通りであつて、焼戻脆化を起せるものと然らざるものとの衝撃値の著しい相異が低温加工に依り減少してゐるのは、軸方向の分離抗力の差異が引張的塑性變形に依り減少した爲と考へられる。

尙焼戻脆化を起した鋼の抗張試験片の破斷面に放射狀龜裂の現れる事も同様の考察に依り説明せられる。即ち此の場合試験片は軸方向には引張加工を受けるが、之は直角方向には壓縮加工を受けた状態に在る譯であつて此の爲軸に直角の方向の分離抗力が低下する結果、此の種の龜裂を生じる。

第 8 表 低温加工に依る衝撃値、硬度の變化

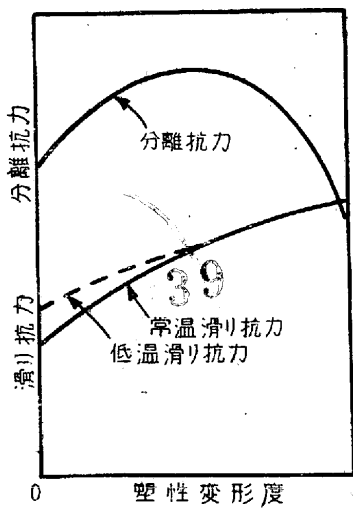
熱處理	低温加工	試験片番號	衝撃値 kgm	硬度 B.H.N.
	施さず	CX1	3.8	262
		CX2	3.6	285
		CX3	2.6	285
		CX4	4.0	285
		平均	3.4	285
850°O.Q., 600°F.C.	20%壓縮	CY1	10.3	262
		CY2	4.2	302
		CY3	6.5	285
		CY4	5.4	277
		平均	5.4	288



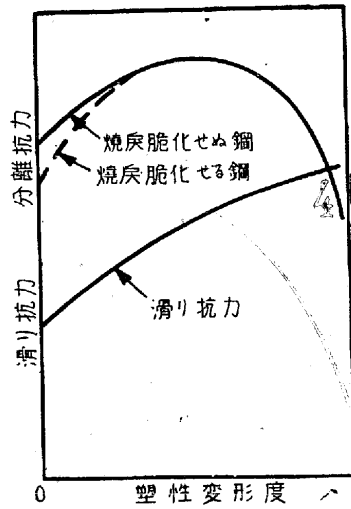
第 18 圖 低炭素クロム鋼の低温強度

る。

尙こゝに一言して置き度い事は、低温脆性には一般に臨界温度の存在する事である。第 18 圖に於てもこれが認められるが、この事より滑り抗力の僅かの變化に依り衝撃値の著しい變化の起る臨界値の存在する事が知られる。此の



第 19 圖 低温に於ける抵抗力曲線の變化



第 20 圖 焼戻脆化に依る抵抗力線曲線の變化

現象は分離抵抗力の變化の場合にも起るもので焼戻脆性は此の例と考へられる。

約言すれば焼戻脆性は分離抵抗力の僅かの相違に依つて現れ、低温脆性の臨界點は滑り抵抗力の僅かの變化に依つて現れるものと言ふ事が出来る。

VII. 結 言

1. 焼戻脆化を起せる鋼は然らざる鋼に比較して滑り抵抗力は殆ど差異無く、分離抵抗力は幾分低く此の差異は壓縮加工に伴ひ増加し、引張加工に伴ひ減少する。

2. W. Kuntze の方法に依つて求める分離抵抗力は多少の塑性變形を伴つた場合の破斷抵抗力を示し。此の塑性變形の爲焼戻脆化を起せる鋼と然らざる鋼との見掛けの分離抵抗力の差が僅少となる。

3. 切缺が鋭い程、切缺底部は塑性變形が困難となり、分離に到るまでの塑性變形度は減少する。随つて切缺衝撃試験の際龜裂の發生狀況は引張塑性變形度が比較的大なる場合の分離抵抗力、滑り抵抗力に支配され、龜裂發生後は龜裂の進行狀況は龜裂自身の

鋭い切缺効果の爲、引張塑性變形が極めて小なる場合の分離抵抗力、滑り抵抗力に支配される。焼戻脆化を起せる鋼が龜裂發生後に急激に破斷するのはこの爲である。

4. 低温脆性に臨界温度の存在する如く滑り抵抗力、分離抵抗力の僅かの變化に依り衝撃値の著しく變化する臨界値が存在する。焼戻脆性もこの1例である。