

## (討27) 鉄鋼の照射脆化の転位論的検討

東大工学部 ○井形直弘 橋口隆吉

照射過程は原子論的過程である。従つてその機構解明にあつては原子論的乃至は転位論的に検討しなければならない。こゝでは純鉄乃至はフェライトにおける照射効果を論ずることとする。また照射量は一定として取扱う。

先づ塑性歪速さを $\dot{\epsilon}$ 、バーガースワクトルの大きさを $b$ 、転位密度を $n$ 、転位の速さを $v$ であらわすと、次の関係が成立つ。

$$\dot{\epsilon} = \alpha n b v \quad (1)$$

この式で $\alpha$ は平均化によつて生ずる係数である。Gilman<sup>(1)</sup>によれば $v$ は次のようにあらわされる。

$$v = v^* \exp\left\{-\frac{D}{\sigma}\right\} \quad (2)$$

式中の $D$ は固溶原子にもとづく Dragging stress を示し $\sigma$ は圧力を示す。 $D$ は不純物濃度 $c$ (純鉄乃至はフェライト中の固溶炭素乃至は窒素)によつて決り次のようであらわされる。<sup>(1)</sup>

$$D = \frac{Ac^{\frac{1}{2}}}{kT} \quad (3)$$

$A$ は転位と不純物原子の相互作用によつて定まる量である。いま $v = v_0$ の場合に $\sigma = \sigma_y$ であるとする、

$$\sigma_y = \frac{D}{\ln\{n b v^* / \dot{\epsilon}\}} \quad (4)$$

照射にもとづく脆性延性遷移温度の上昇 $\Delta T_\phi$ は降伏強さ $\sigma_y$ 及び破壊強さ $\sigma_f$ の照射にもとづく変化を夫々 $\Delta\sigma_y$ 及び $\Delta\sigma_f$ とした場合次のようになる。<sup>(2)(3)</sup>

$$\Delta T_\phi = \frac{\Delta\sigma_f - \Delta\sigma_y}{\frac{d\sigma_y}{dT}} \quad (5)$$

$\Delta\sigma_f$ は $\Delta\sigma_y$ に比べて一般に小さく、また式の繁雑さを避ける意味で以下 $\Delta\sigma_f \approx 0$ として進めることとする。純鉄乃至はフェライトの照射の場合には固溶炭素乃至は窒素(特に窒素が重要)が照射によつて形成される点欠陥と複合欠陥を形成し、新たな硬化の原因となつてゐることが考えられるので、 $D$ は照射後 $D_\phi$ になると考える。また内部摩擦の振巾依存性における break away stress が照射によつて上昇するところから転位の照射欠陥によるくきづけが考えられるので、転位密度 $n$ が照射で $n - \Delta n$ になるとし $\Delta n/n$ を $\beta$ とする。この場合 $\Delta\sigma_y$ 及び $\frac{d\sigma_y}{dT}$ は次のようになる。

$$\Delta\sigma_y = \frac{D_\phi}{\ln\{(n - \Delta n) b v^* / \dot{\epsilon}\}} - \frac{D}{\ln\{n b v^* / \dot{\epsilon}\}} \quad (6)$$

$$\frac{d\sigma_y}{dT} = \frac{-D/T}{\ln\{n b v^* / \dot{\epsilon}\}} \quad (7)$$

(5), (6) 及び (7) より 
$$\Delta T_\phi = T \left\{ \frac{D_\phi}{D} \frac{\ln\{n b v^* / \dot{\epsilon}\}}{\ln\{(n - \Delta n) b v^* / \dot{\epsilon}\}} - 1 \right\} \quad (8)$$

こゝで $T$ は照射前の遷移温度に対応するので照射後の遷移温度を $T_\phi$ とすると、 $T_\phi = T + \Delta T_\phi$ から次式が得られる。

$$\frac{T_\phi}{T} = \frac{D_\phi}{D} \left\{ \frac{\ln\{n b v^* / \dot{\epsilon}\}}{\ln\{(n - \Delta n) b v^* / \dot{\epsilon}\}} \right\} \quad (9)$$

(9)式を転位密度  $n$  で微分すると,

$$\frac{d\left(\frac{T_0}{T}\right)}{dn} = \frac{D_0}{D} \frac{\frac{1}{n} \left[ \ln \left[ (n-an) b v^* / \epsilon \right] - \ln \left[ n b v^* / \epsilon \right] \right]}{\left[ \ln \left[ (n-an) b v^* / \epsilon \right] \right]^2} \quad (10)$$

(10)式で  $\beta (= \frac{an}{n}) = 0$  とすれば  $\frac{d\left(\frac{T_0}{T}\right)}{dn} = 0$ ,  $\beta = 1$  とすれば  $\frac{d\left(\frac{T_0}{T}\right)}{dn} < 0$  となる。

次に照射後の遷移温度  $T$  が  $\sigma_y = \sigma_T = B$  の条件で決まるとすると, (3), (4)より

$$T = \frac{A c^{\frac{1}{2}}}{B k \ln \left[ n b v^* / \epsilon \right]} \quad (11)$$

これを転位密度  $n$  で微分すると次のようになる。

$$\frac{dT}{dn} = \frac{-A c^{\frac{1}{2}} / n}{B k \left[ \ln \left[ n b v^* / \epsilon \right] \right]^2} \quad (12)$$

(12)式では一般に  $\frac{dT}{dn} < 0$  であり動き得る転位の多い方が遷移温度が低くなることを示しているが, これは試料に時効を含まない場合の結果であり, 若し試料内に時効時間 (室温長時間を含む) のアンバランスがあれば  $\frac{dT}{dn} < 0$  の関係はくずれものと考えられる。またこの関係は転位密度をある範囲内で変動させた場合に成立するのであり, 広範囲に変える場合例えば数%程の変位を与える場合には  $n$  の代わりに  $n_0 + M \epsilon_p$  ( $\epsilon_p$  は塑性歪,  $n_0$  は変形前の転位密度) とおき,  $D$  の代わりに  $D + H \epsilon_p$  ( $H$  は硬化係数) とする形をおかなければならぬ<sup>(1)</sup> ので, その結果として  $\frac{dT}{dn} > 0$  となるがそれについては別に述べ度い。

照射後の遷移温度  $T_0$  の転位密度依存性は結局次のようになる。

$$\begin{aligned} \frac{dT_0}{dn} &= \frac{d\left(\frac{T_0}{T}\right)}{dn} T + \frac{T_0}{T} \frac{dT}{dn} \\ &= \frac{T \cdot D_0}{D \cdot \ln \left[ (n-an) b v^* / \epsilon \right]} \left[ \frac{\frac{1}{n} \left[ \ln \left[ (n-an) b v^* / \epsilon \right] - \ln \left[ n b v^* / \epsilon \right] \right]}{\ln \left[ (n-an) b v^* / \epsilon \right]} - \frac{1}{n} \right] \\ &= \frac{-T \cdot D_0 \left[ \ln \left[ n b v^* / \epsilon \right] \right]}{n \cdot D \left[ \ln \left[ (n-an) b v^* / \epsilon \right] \right]^2} < 0 \quad (\beta = 0 \text{ 或 } \beta = 1) \end{aligned} \quad (13)$$

固溶炭素及び窒素原子の影響としては(9)式を  $c$  で微分すると次のようになる。

$$\frac{d\left(\frac{T_0}{T}\right)}{dc} = - \frac{D_0}{2DC} \frac{\ln \left[ n b v^* / \epsilon \right]}{\ln \left[ (n-an) b v^* / \epsilon \right]} < 0 \quad (14)$$

また(11)式より  $\frac{dT}{dc} = \frac{A}{B k 2 c^{\frac{1}{2}} \ln \left[ n b v^* / \epsilon \right]} = \frac{T}{2c} > 0 \quad (15)$

$$\therefore \frac{dT_0}{dc} = \frac{d\left(\frac{T_0}{T}\right)}{dc} T + \frac{T_0}{T} \frac{dT}{dc}$$

$$= \frac{-T D_0 \ln \left[ n b v^* / \epsilon \right]}{2CD \ln \left[ (n-an) b v^* / \epsilon \right]} + \frac{T D_0 \ln \left[ n b v^* / \epsilon \right]}{2CD \ln \left[ (n-an) b v^* / \epsilon \right]} = 0 \quad (16)$$

固溶炭素及び窒素は照射後の遷移温度を上昇させるが照射後は変化がないことになる。

(1) J. J. Gilman, J. Appl. Phys. 36 (1965) 2772, J. Appl. Phys. 36 (1965)

文献 (2) 井形, 橋口, 鉄と鋼 52, No. 11 (1966) S131

(3) 井形, 橋口, 鉄と鋼 53, No. 5 (1967) S114

(4) 昭和38年度, 昭和39年度 鉄鋼照射試験研究合同委員会報告