でない現在では妥当な説明は困難なようで、今後の研究が必要である。

V. 結 論

Al-0.041~4.4at% Zn の数種の合金について、主として電気抵抗の測定による実験結果と考察とより以下の結論を得た。

(1) 200~300°C より焼入後、G.P. ゾーンのソルバスより高い温度で焼鈍した場合の電気比抵抗の増加はクラスターの形成によるものである。

(2) 1 つの合金については、クラスターを含む状態は焼鈍温度のみによりきまり、焼入温度には関係しない。

(3) クラスターは G.P. ゾーンのソルバスよりも高い温度で存在し、Al-0.041 at% Zn のような稀薄な合金中にも形成される。

(4) クラスターの形成過程を用いて求めた空孔の形成エネルギー、Zn 原子の移動の活性化エネルギーは G.P. ゾーンの形成過程を用いて求めたそれぞれの値とよく一致す

る。しかし、クラスターと G.P. ゾーンとは異なるものようである。

文 献

- (1) P.S.Rudman and B.L.Averbach : *Acta Met.*, **2**(1954), 576.
- (2) P.S.Rudman, P.A.Flinn and B.L.Averbach : *J. Appl. Phys.*, **24**(1953), 365.
- (3) A.M.Levelut and A.Guinier : *Small-Angle X-Ray Scattering*, Proceedings of the conference held at Syracuse Univ., 1965, Gordon and Breach, Science Publ.N.Y., London, (1967).
- (4) A.J.Perry : *Acta Met.*, **14**(1966), 1143.
- (5) 太田陸奥雄, 橋本文雄 : 金属学会誌, **36**(1972), 321.
- (6) 太田陸奥雄, 橋本文雄, 前田裕宣 : 金属学会誌, **32**(1968), 1097.
- (7) 平野賢一, 堀 仁 : 金属学会誌, **36**(1972), 97.
- (8) 堀 仁, 平野賢一 : 金属学会誌, **37**(1973), 135.
- (9) C. Panseri and T. Federighi : *Acta Met.*, **8**(1960), 217.
- (10) M.Ohta : *Trans. JIM*, **5**(1964), 171.
- (11) 太田陸奥雄 : 金属学会誌, **23**(1959), 177.
- (12) M.H.Jacobs : *Metal Sci. J.*, **6**(1972), 143.
- (13) E.L.Huston, J.W.Cahn and J.E.Hilliard : *Acta Met.*, **14**(1966), 1053.

体心立方金属の軸対称変形における方位回転の計算*

関 根 和 喜** 吉 村 修***

Kazuyoshi Sekine and Osamu Yoshimura : Calculation of Lattice Rotations in Axisymmetric Flow for BCC Metals Deforming by {110} <111> and {112} <111> Slip. The generalized maximum work procedure proposed by the authors (*J. Japan Inst. Metals*, **40**(1976), 457), in which the rotation vector of crystals under constrained deformation can be determined uniquely, was applied to the calculation of lattice rotations in bcc metals deforming by {110} <111> and {112} <111> slip systems for axisymmetric tension and compression. The computer-predicted results indicated that the <110> single fiber texture in tension and the <111> + <100> double fiber texture in compression develop in bcc metals.

(Received November 28, 1975)

I. 緒 言

結晶塑性に関する Bishop-Hill の最大塑性仕事の原理を拡張した新たな考え方に立脚し、拘束塑性変形を受ける多結晶金属の方位回転を一義的に求める手法と、その応用例として、{111}<110> すべり系で変形する fcc 金属の軸対称変形における方位回転の計算結果を、すでに第 2 報⁽¹⁾に報告した。

さて、bcc 金属においては、その活動すべり系は、slip trace が wavy になることから、fcc 金属におけるように単純ではない。すべり系のすべり方向が <111> であることは多くの研究が一致するところであるが⁽²⁾、そのすべり面は確定せず、例えば、鉄の常温変形では、<111> ペンシルすべりが生ずるとも、あるいはすべり面は {110}, {112}, {123} に限定されるともいわれている⁽²⁾。また、Mo, Nb, W 等では、{110}<111> と {112}<111> のみ

** 横浜国立大学工学部安全工学科 (Department of Safety Engineering, Faculty of Engineering, Yokohama National University, Yokohama)

*** 横浜国立大学大学院 (Graduate School, Yokohama National University, Yokohama)

* 1975 年 10 月金属学会札幌大会に発表; 集合組織形成の計算機シミュレーションに関する研究 (第 4 報)

る。また、結晶回転の降伏条件式は、前報⁽¹⁾で示したごとく次式ようになる。

$$C_R^2 \geq s_7^2 + s_8^2 + s_9^2 \quad (3)$$

ここで、 C_R は多結晶体中の結晶粒が拘束変形によって回転するとき、それに抵抗する力のようなもので、隣接粒との相対的回転を生ずるために必要な最小応力を意味する臨界回転応力である。以上から、*bcc* 金属結晶では、式(1)と式(3)の合計 49 個の降伏曲面が 9 次元応力空間に存在することになる。

つぎに、軸対称変形における巨視的引張り軸あるいは圧縮軸(対称軸)方向を X 、それに直交する 2 つの方向を Y と Z とすると、指定されるべき巨視的ひずみ増分は、座標系(X - Y - Z)に関して、

$$d\epsilon_{XX} = -2d\epsilon_{YY} = -2d\epsilon_{ZZ}, d\epsilon_{XY} = d\epsilon_{YZ} = d\epsilon_{ZX} = 0 \quad (4)$$

となる。ただし、 $d\epsilon_{XX}$ は軸ひずみ増分を表わす。そして、 X 軸と x_3 ([001]) 軸を含む面の $x_2=0$ なる面からの子午線角を ϕ 、 X と x_3 軸とのなす角を $(\pi/2-\mu)$ とするような角度 μ によって X 軸の座標系(x_1 - x_2 - x_3)に対する関係を表示すると†、座標系(x_1 - x_2 - x_3)に関する巨視的塑性 distortion 増分成分は次のようになる。

$$\begin{aligned} d\epsilon_1 &= 1/2(3\cos^2\mu\cos^2\phi-1) \cdot d\epsilon_{XX} \\ d\epsilon_2 &= 1/2(3\cos^2\mu\sin^2\phi-1) \cdot d\epsilon_{XX} \\ d\epsilon_3 &= -(d\epsilon_1 + d\epsilon_2) \\ d\epsilon_4 &= 3/2(\cos\mu\sin\mu\sin\phi) \cdot d\epsilon_{XX} \\ d\epsilon_5 &= 3/2(\cos\mu\sin\mu\cos\phi) \cdot d\epsilon_{XX} \\ d\epsilon_6 &= 3/2(\cos^2\mu\cos\phi\sin\phi) \cdot d\epsilon_{XX} \\ d\epsilon_7 &= d\epsilon_8 = d\epsilon_9 = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

結晶に生ずる塑性仕事増分 $W(s_i)$ は、

$$W(s_i) = \sum_{i=1}^9 s_i \cdot d\epsilon_i \quad (6)$$

で与えられるので、ここで考えられている結晶回転の問題は、制約条件式(1)と(3)のもとで目的関数(object function) $W(s_i)$ を最大とするような最適応力ベクトル $\{s_i^0\}$ を求める、という非線型最適化問題として解くことができる。そして、結晶の回転軸の方向のみを示す単位ベクトル $\mathbf{r}$ は、式(1)、(3)および(6)で示される最大値問題の最適解を s_i^0 とすると、

$$\mathbf{r} = \{s_7^0/C_R, s_8^0/C_R, s_9^0/C_R\}^T \quad (7)$$

で与えられ、これから結晶の回転方向を計算することができる。

本報では、 $\{110\}\langle 111 \rangle$ と $\{112\}\langle 111 \rangle$ のすべり系の臨界せん断応力はすべて等しいと考えて、加工硬化を無視した。そして、臨界せん断応力 C_k と式(3)における臨界回転応力 C_R の比の値 (C_k/C_R) は、これを定める実験的根拠がないため、予備的に行った計算機実験により仮定し

た。すなわち、 (C_k/C_R) の値を 10 あるいはそれ以下に定めると、 X 軸の方位が $[100]$ - $[110]$ - $[111]$ ステレオ 3 角形内にあるとき、この 3 角形内の広範な領域において回転が生じないという現象が現われる。実際には、このような回転の生じない安定方位領域は、ステレオ 3 角形内のごく限られたわずかな領域であるはずである。このような条件を満たすためには、*bcc* 金属の場合、 (C_k/C_R) 値は 50~100 以上であることが計算機実験より明らかとなった。そこで、ここでは $(C_k/C_R) \cong 100$ と設定して、数値計算を行った。用いた最適値探索法は生成応答曲面法による SUMT である⁽⁹⁾。〈付録参照〉

III. 数値解析の結果

引張りおよび圧縮変形時に生ずる回転方向の数値解析結果を、それぞれ Fig.1 と Fig.2 の $[100]$ - $[110]$ - $[111]$ 3 角形内に示す。ただし、矢印は任意の回転量を与えたとき

Fig.1 Computed lattice rotation based on $\{110\}\langle 111 \rangle$ and $\{112\}\langle 111 \rangle$ slip systems for axisymmetric tension. The mark $\times$ indicates no rotation.

Fig.2 Computed lattice rotation based on $\{110\}\langle 111 \rangle$ and $\{112\}\langle 111 \rangle$ slip systems for axisymmetric compression. The mark $\times$ indicates no rotation.

† これらの関係の(100)標準ステレオ投影図上での表記は前報⁽¹⁾の Fig.2 を参照されたい。

の回転方向のみを示して、図中のX印は、回転の生じない軸方位で、安定方位を意味している。Fig.1とFig.2は、bcc金属の軸対称変形においては引張り集合組織として単純[110]繊維組織が、また圧縮変形では、[111]を主成分とし[100]を副成分とする二重繊維組織が発達することを示している。本報の解析は比較的単純な仮定から出発したものであるが、ここで与えられた解析結果から鉄やNb等の引抜きや圧縮集合組織の形成⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾を理解することができると考えられる。

IV. 結 言

前報(金属学会誌, 40(1976), 457)において、拘束変形下の結晶回転挙動を唯一に求める手法を提案したが、この手法を{110}<111>と{112}<111>の2つのすべり系が混合して作動すると仮定したときのbcc金属の軸対称引張りならびに圧縮変形における結晶格子回転の計算に適用した。計算機によって示された結果は、引張り変形では[110]繊維組織、また圧縮変形では[100]+[111]2重繊維組織が形成されることを示していた。

最後に、御指導いただいた横浜国立大学工学部の井上威恭教授と上城太一教授、ならびに大阪大学工学部の福迫達一教授に謝意を表します。

文 献

- (1) 関根和喜, 吉村 修, 井上威恭, 上城太一: 金属学会誌, 40(1976), 457.

- (2) 阿部秀夫: 鉄と鋼, 52(1966), 882.
 (3) F.M.A.Carpay, G.Y.Chin, S.Mahajan and J.J. Rubin: Acta Met., 23(1975), 1473.
 (4) A.J.Opinsky and R.Smoluchoski: J. Appl. Phys., 22(1951), 1380.
 (5) G.I.Taylor: J.Inst.Metals, 62(1938), 307.
 (6) J.F.W.Bishop and R.Hill: Phil. Mag., 42(1951), 414.
 (7) 例えば, 小野勝章: 線型計画法入門, オーム社, p.97.
 (8) P.Von Houtte and E.Aernoudt: Z.Metallk., 66(1975), 202.
 (9) C.A.Carroll: Operations.Res., 9(1961), 169.
 (10) H.Hu: Texture, 1(1974), 233.
 (11) I.L.Dillamore and W.T.Roberts: Met.Rev., 10(1965), 271.

付 録

SUMTとはSequential Unconstrained Minimization Techniqueの略で、制約条件式が不等式のみ、または等式と不等式からなる場合に、目的関数の最小点を与える方法である。いま、制約条件 $g_i(\mathbf{X}) \geq 0 (i=1, 2, 3, \dots, I)$ のもとで、目的関数 $f(\mathbf{X})$ を変数 $\mathbf{X}$ (ベクトル表示)に関して最小にするという問題の解は、制約条件のない最小化問題、すなわち関数

$$Q(\mathbf{X}, \lambda_k) = f(\mathbf{X}) + \lambda_k F(g_i(\mathbf{X}), \text{all } i)$$

を最小にするという問題の、 $\lambda_k \rightarrow 0$ の解の極限值として求められる。ここで、関数 $Q(\mathbf{X}, \lambda_k)$ によって定まる曲面を生成応答曲面という。

40Cr-4Al-Ni合金における γ' 相と α -Cr相の複合析出の電顕観察*

小 松 周 一** 中 橋 昌 子**
 渡 辺 迪** 霜 鳥 一 三**

Shuichi Komatsu, Masako Nakahashi, Itaru Watanabe and Kazumi Shimotori: Microscopic Observation of γ' and α -Cr Duplex Precipitation in 40Cr-4Al-Ni Alloy. It had been found that 40Cr-4Al-Ni alloy showed extremely high age-hardenability. The hardness of this alloy, for example, was approximately 680 Hv after heat treatment at 700°C for 30 min. The age-hardenability was suggested to be derived from the duplex precipitation of Ni_3Al type γ' and α -Cr phases. However, the morphology of the precipitated phases has not been clarified.

In the present work, the transmission electron microscopic observation was made on the specimens heat treated at various temperatures. It was found that γ' and α phases showed different morphologies in three temperature regions, below 500°C, 550~700°C and 800~900°C. In the region below 500°C only the α phase precipitated. The maximum age-hardenability was

** 東京芝浦電気株式会社総合研究所金属セラミック材料研究所(Metals and Ceramics Laboratory, Research and Development Center, Tokyo-Shibaura Electric Co., Ltd., Kawasaki)

* 1974年4月金属学会習志野大会および1974年11月東大阪大会に発表