

1. はじめに

ステンレス鋼には Cr のみを主要合金元素とする Cr 系と、Cr と Ni の両方を多量に含む Cr-Ni 系の 2 種類がある。また、組織の観点から Cr 系はフェライト系とマルテンサイト系に分類され、Cr-Ni 系はオーステナイト系と呼ばれる。本研究ではその中でもフェライト系に分類される Fe-30%Cr 合金多結晶を研究対象として取り上げた。

Fe-Cr 合金は Cr13%以上でフェライト α 相となる。特に Cr を約 17%以上含み炭素量 0.2%以上の鉄鋼を高クロムフェライト系耐熱鋼と呼ぶ。高クロムフェライト系耐熱鋼は、フェライトが低温から高温まで安定となり、 $\gamma \rightarrow \alpha$ 相による組織制御ができないため強度はマルテンサイト系やオーステナイト系耐熱鋼に比べて低い。しかし、熱膨張率が小さく繰り返し加熱冷却しても表面の酸化スケールが剥離しないため、ボイラーの燃焼室や自動車の排ガス浄化装置など高温強度よりも耐酸化性を重視した静止部品などに使用されており、実用化されているものとして SUS403(18Cr-0.1C)などがある。

B. C. C. 構造を持つ Fe-30%Cr 合金多結晶を島津製作所製インストロン型試験機を使用して温度範囲 294K~1223K でひずみ速度急変試験を行ったところ温度範囲 573K~873K で Serration が現れた。フェライト系ステンレス鋼の P-L 効果に関する研究は E. Pink と A. Grinberg¹⁾ が報告している。しかし、この研究では Serration の原因となる溶質原子の拡散の活性化エネルギーについて言及されていない。

本研究では Fe-30%Cr 合金多結晶を用いて Serration の起こる温度範囲と溶質原子の拡散の活性化エネルギーを求めるとともに、Serration の機構について転位と溶質原子の相互作用の観点から検討を行った。

2. 試片

溶融法で作成された Fe-30%Cr 合金多結晶バルク材をマルチカッターを使用し、長さ 30mm 厚さ 1mm 幅 3mm の短冊状に試験片を切り出した。その後、1273K で 1 h 焼鈍を行い電解研磨して実験に供した。用いた多結晶バルク材の化学組成式を Table 1 に示す。

Table 1 Chemical composition of material (mass%).

C	Si	Mn	P	S	Cu
0.0028	0.010	<0.005	0.0005	0.0019	<0.001
Ni	Cr	Al	O	N	Fe
<0.001	30.09	<0.001	0.0004	0.0158	Bal.

3. 実験方法

引張試験には島津製作所インストロン型試験機（オートグラフ AGS500B）を使用した。また 1:10 のひずみ速度

急変試験を行いひずみ速度感受性指数 m の値を算出し、有効応力 σ^* 、内部応力 σ_i 、変形の活性化エネルギー H を求めた。

4. 解析方法

体心立方固溶体合金を適当な温度およびひずみ速度で引張試験変形すると、応力-ひずみ曲線は最初は平滑であるが、あるひずみ量から鋸歯状を呈する。この現象は、serrated flow, repeated yielding,あるいは discontinuous yielding などと呼ばれるが、とくに溶質原子の拡散によってそれが起こる場合を Portevin-Lechatelier effect (P-L 効果) という。Serration の活性化エネルギーについて検討を行う。

アインシュタインの関係式より溶質原子の移動速度は

$$v_i = (FD_0/kT) \exp(-E/kT) \quad (1)$$

ここで $F = -\text{grad}V$ 、 V は転位と溶質原子の相互作用エネルギー、 D_0 は拡散係数、 E は溶質原子の拡散の活性化エネルギーである。またひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ は

$$\dot{\epsilon} = Nb\bar{v}_d \quad (2)$$

で与えられる。ここで N は運動する転位の数、 $\bar{v}_d$ は運動する転位の平均速度、 b はバーガースベクトルである。いま、溶質原子の拡散速度が適当な大きさとなって運動する転位と相互作用を持つ場合に P-L 効果が現れると考えるとその場合に次のような簡単な関係が満たされるとすれば

$$\bar{v}_d = \xi v_i \quad (\xi \text{ は定数}) \quad (3)$$

(1)、(2)、(3) 式より臨界ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_c$ は

$$\dot{\epsilon}_c = C/T \cdot \exp(-E/kT)$$

$$T\dot{\epsilon}_c = C \cdot \exp(-E/kT)$$

$$\log(T \cdot \dot{\epsilon}_c) = (-E/kT) + \log C \quad (C = \text{constant}) \quad (4)$$

となる。ここで $C = \xi NbD_0F/k$ である。

ここでもし $\log(T \cdot \dot{\epsilon}_c)$ と $1/T$ とのプロットから直線を得られれば、その勾配より Serration の活性化エネルギーを得ることができる。

5. 実験結果

Fig. 1 は変形の活性化エネルギーの温度依存性を示したものである。本研究で求めた Fe-30%Cr 合金多結晶の活性化エネルギーと比較を行うために Conrad ら⁽²⁾ が求めた純 Fe の値も示してある。図の温度範囲 573K~873K において

Serration が現れたためひずみ速度急変試験を行うことができず変形の活性化エネルギーを算出することができなかった。図より温度の上昇とともに活性化エネルギーも増加していることがわかる。また温度範囲 949K~1049K の活性化エネルギーは 9.26eV~9.95eV となった。同じ温度範囲の純 Fe の値 3.1eV と比較するととても高い値となった。これは置換型固溶原子である Cr の拡散と転位の相互作用によるものと考えられる。

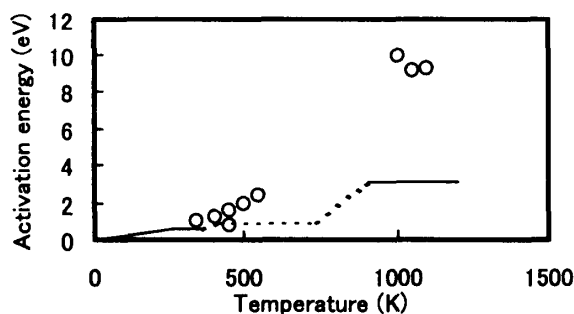


Fig. 1 Activation energy as a function of temperature for Fe-30%Cr alloy.

Fig. 2はFe-30%Cr多結晶のSerrationの起こる条件を、変形温度とひずみ速度で表したものである。図中の黒丸で示される条件の場合 Serration が現れた。ここで Serration の起こる臨界条件の点から直線を得ることにより、この直線の勾配から Serration の活性化エネルギーを求めることができる。この方法を用いて Serration の活性化エネルギーを求めたところ 2.60eV となった。

Fig. 3 は Fe-Cr 系における自己拡散の活性化エネルギーの濃度依存性について求めたグラフである。⁽³⁾このグラフより Fe-30%Cr 合金中の Cr の自己拡散の活性化エネルギーは 2.31eV となる。本研究で求めた活性化エネルギーは 2.60eV であるので値がほぼ一致した。

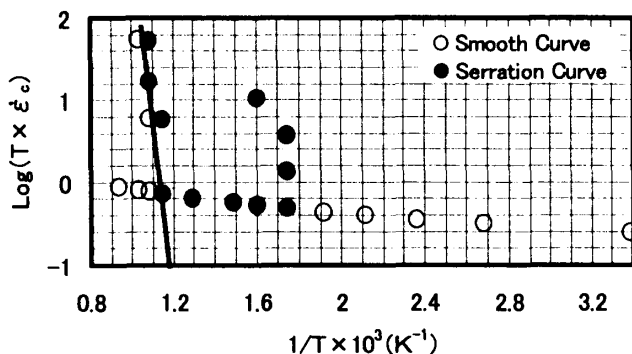


Fig. 2 Temperature range of serration in Fe-30%Cr polycrystals.

0.2%耐力における変形応力と変形温度との関係を Fig. 4 に示した。また比較を行うために Fe-30%Cr 合金単結晶の 0.2%耐力における変形応力と変形温度との関係も同じ図に示してある。

図より単結晶約 373K~473K, 多結晶約 423K~523K において変形応力増大の山が現れている。これは侵入型固溶原子である C の拡散と転位の相互作用により変形応力が増大したためと考えられる。また多結晶において約 573K~923K の温度範囲において Serration が現れ約 773~973K の温度範囲において再び変形応力増大の山が見られた。これは置換型固溶原子である Cr の拡散と転位の相互作用により変形応力が増大したためと考えられる。

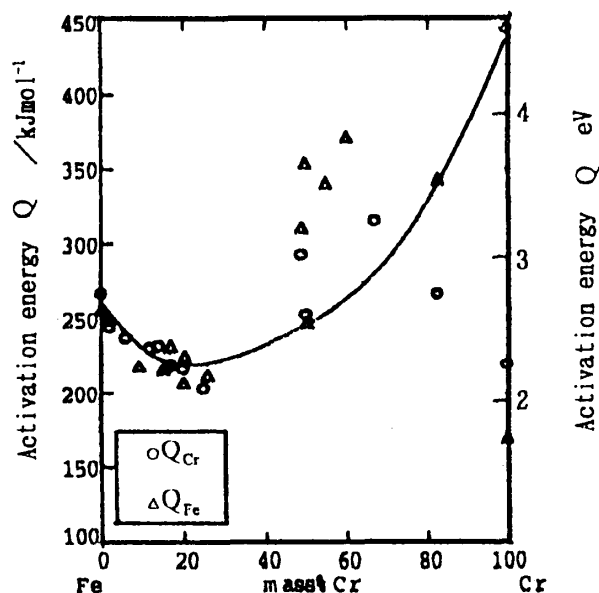


Fig. 3 Concentration dependence of activation energy in Fe-Cr system.

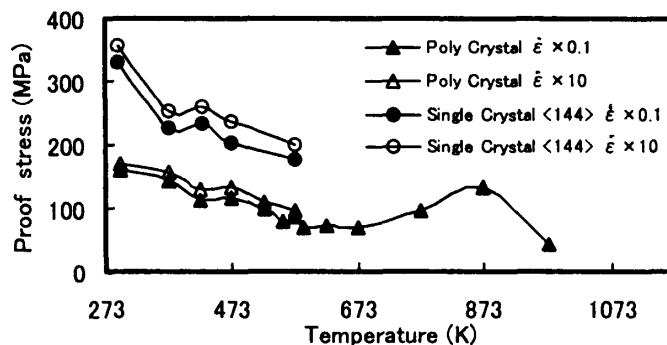


Fig. 4 Proof stress as a function of temperature for Fe-30%Cr alloys.

本研究に用いた Fe-30%Cr 合金多結晶を作成、提供していただいた同志社大学の御牧拓郎博士、宮本博之博士に謝意を表します。

参考文献

- (1) E. Pink and A. Grinberg : Materials Science and Engineering , 51.1 (1981)
- (2) H. Conrad : Journal of Metals , July , 582 (1964)
- (3) 杉山幹英 山崎仁丈 高木清一 安彦兼次 飯島嘉明 : 日本金属学会秋期大会講演概要, 564 (1999)