

1. はじめに

超塑性現象は発見されて以来、一部の研究者を除いて一般に注目を集めなかったが、最近研究が活発になってきた。超塑性合金の大きな変形が粒界挙動に深くかかわりをもつことや、変形応力が低いという特徴が塑性加工性、成形性の改善に利用できる可能性などに関心がもたれだしたことによると思われる。今日ではすでに工業的利用も一部でかなり進展している。しかしながら、超塑性に関する研究の歴史は浅く、現象の把握も充分になされているとはいえない。殊に変形機構については不明確なところが多い。

ここでは微細結晶粒超塑性の主に基礎的な事項について最近の研究を概説し知見の整理を行いたい。

2. 現象論的研究

超塑性が巨大な伸びを現れし、かつ変形応力のひずみ速度感受性が大きいことから、伸びと M 値との関係が注目され、伸びを M の関数とする表示が試みられ、 M 値が超塑性の尺度として提案された。ここで超塑性変形中長時間にわたって変形条件や組織の変化のないことを保証できない。それゆえ変形の初期に測定された M 値ですべての超塑性伸びを記述するには自づと限界がある。

M 値の測定法については従来なされたそれぞれの報告に詳しくは記されていない。定速度試験から変形応力 $\sigma = K \dot{\epsilon}^m$ にて求めるもののほか、ひずみ速度急変法が簡便なために多く用いられている。この速度急変法にしても急変前後の応力の求め方に数種の異なった方法があって、それぞれの測定法によって M の絶対値に差異を生じる。したがって M の絶対値によって各研究者による結果を厳密には比較できない。

M 値の測定に関して以下についても考察されている。

ひずみ速度比¹⁾, ひずみ速度分布など

一方、超塑性変形は試験片ゲージ部全域にわたり均一に変形しているわけではない。多くの超塑性合金についての組織観察の結果によれば、超塑性変形の大部分は粒界すべりによってまかなわれている。また、変形応力 σ でなく粒界すべりが有効応力 σ_e によってもたらされるとして、そのときの $M_{gbs}(\sigma_e)$ が計算された。Table I に示すように、微細結晶粒試料を用いた超塑性変形ではもとより、粗大結晶粒試料を用いて超塑性変形からはずれた変形条件の場合であっても、粒界すべりのひずみ速度感受性指数 M_{gbs} の値は0.8前後の高い値を示している。

Table I. Values of M , M_{gbs} and $M_{gbs}(\sigma_e)$ obtained for Pb-Sn eutectic alloy deformed under superplastic and non-superplastic deformation.²⁾

specimen	M	M_{gbs}	$M_{gbs}(\sigma_e)$
fine grain	0.54	0.76	0.95
coarse grain	0.25	0.83	

3. 金属組織学的取扱

大きな伸びと高い M 値を示す超塑性変形の変形機構を明らかにするには変形組織の観察はもとより重要である。通常の金属材料の引張試験における破断伸びはたかだか数十%までである。そこで試料表面でのケガキ線法によって、

先づひずみ分布が測定された。大きな粒界すべりは試料表面の観察結果に限らず、内部のマーカー法による観察で試験片内部でも起こっていることが確かめられた。そして M 値の高い変形条件の下では、全ひずみに対する粒界すべりの寄与の割合が高くなり、しかも $M > 0.5$ の変形条件では、ほとんどひず

べての大傾角粒界で粒界すべりを起こしているのが観察された。

超塑性変形には結晶粒度の小さいほど好都合で、一般に10 μ m以下の粒径がねらいとされている。

Fig. 1はTi-6Al-4V合金のひずみによる m 値の変化で α の粒径変化と関連している。微細結晶粒超塑性の変形機構を明らかにするには結晶粒界すべりとそれが破断につながるようなボイドの発生を伴わないための適合する調整機構を明らかにすることである。

高温変形としての超塑性変形を定常クリープひずみの取扱から解析された。³⁾ 粒界すべりとともに粒内すべり量を測定し、これから拡散流動によるひずみを求めて超塑性変形中の相互の関係からひずみ硬化指数 $n (=1/m)$ およびみかけの活性化エネルギーを求めて結晶粒内すべりが粒界すべりを律速するとされた。さらに超塑性変形の、いわゆる領域IIにとどまらず領域IおよびIIIにわたる高温変形機構を連続的、統一的に理解できる機構の構築についてもいくつかの試みが重ねられている。⁴⁾

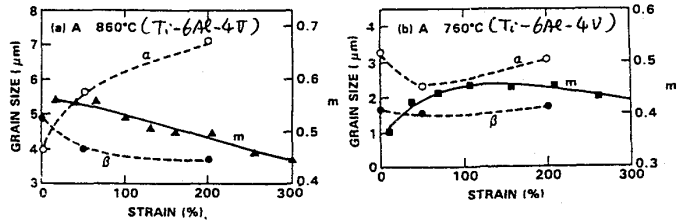


Fig. 1. Changes in alpha and beta phase grain sizes corresponding to changing m with strain.

4. 結晶粒微細化技術

微細結晶粒超塑性の発現に重要な金属組織学的要諦として結晶粒が細かく等軸粒で、しかも各結晶粒界は高傾角粒界であることが必要である。温間加工でしばしば現われる小傾角粒界は粒界すべりを生じ難い。同様の理由によってスピノーダル分解で得られる混合組織もそのままでは超塑性を示さない。さらに強加工して微細再結晶組織にすると超塑性を示す。純金属で超塑性を発現した例は多いが、一般に単相合金では高温変形中に結晶粒の成長をおこし易い。微細結晶粒の高温安定性を高めるには母相結晶粒の成長を細かい α 2相粒子によって抑えるか、 α 2相自体の容積率を高くする。後者の例として共晶あるいは共析合金が開発された。supral は前者の例である。Al, Cu, Ti合金, 鉄鋼とそれぞれの合金に適合した加工熱処理によって微細結晶粒を形成させ、各々について超塑性変形し、4850%から5500%に達する伸びが報告されている。

5. キャビテーション

cavityの発生、成長、連結の過程は重要で何れもひずみ速度、温度に敏感である。発生は粒界三重点、粒界上の微細 α 2相粒子あるいは粒界ledgeでの応力集中にもとづくと考えられるが、直接発生箇所を確かめるのは困難である。また2000%に及ぶ大きな伸びの後でもほとんど成長しない安定な場合もある。しかしcavityの形成は破断に導くおそれのみならず低温あるいは室温での伸び、衝撃抵抗を著しく低下させるので、cavitationの研究は重要で、大いに待たれるところである。

6. おわりに

微細結晶粒超塑性の研究は盛んになったが、まだ理論的基礎的に未解決問題が多い。一般的事項について述べたが、特殊な問題についても二・三言及したい。

文献 1) 畑山, 和泉; 塑性と加工, 16(1975)981, 2) N. Furushiro & S. Hori; Script. Met., 13(1979)653, 3) 松本, 針山, 時沢; 金属学会誌, 45(1981)935, 4) M. Kobayashi et. al.; Superplasticity Eds. B. Baudalet & M. Suery Conf. Int. Grenoble (1985) 12.1