

討37

チタン系材料の超塑性と加工

三菱金属㈱ 中央研究所 西野 良夫

○木村 敏郎

1. 緒言

Pb-Snでの発見に始まり、主としてZn-Al合金¹⁾で研究されてきた超塑性が、チタン、チタン合金にもあることが見い出されたのは比較的新しい。この超塑性が、塑性異方性R値を低減させる条件をさがしているうちに見い出されたことは興味深い。つまり、Ti合金の高強度、延性の不足、スプリングバックの過大といった成形上の問題をクリアする条件と超塑性条件が一致していたということである。その後主として米国においてTiの超塑性研究が進められ、同時に、その加工への応用が展開されてきた。これらの応用は未だ開発中のものも多く、また実用化の程度についても不明のものも多いが、概略について述べる。

2. Tiの超塑性

Ti合金は $\alpha + \beta$ 2相温度領域での低歪速度引張において、著しく高いm値（歪速度感受性指数）を示し、1000%を越える著しい延性を示す見い出された（Fig.1, 2）²⁾。また、鉄鋼等と同様に α, β 温度領域での熱サイクルによって変態超塑性を示すこともわかった（Fig.3）³⁾。Fig.3には、恒温超塑性と変態超塑性双方のm値を示すが、変態超塑性のm値は絶対値は小さいものの、より高歪速度側にピークを有する。Ti合金は鉄と比較して数倍変形抵抗の変化率が大きいのが、これは、Ti合金において変態温度領域が広いこと、変態に伴う内部応力が小さいことによると考えられている。Ti合金の場合、このように変態超塑性にも興味深い点が多いが、工業的な利用が難しいために、これまであまり研究されていない。しかし、D. Lee等²⁾も変態中の拡散速度の増加、応力誘起変態等の恒温超塑性への関与を示唆しており、この観点も重要である。

Ti合金の恒温超塑性は、Fig.4⁴⁾に示すような結晶粒度依存性を示すので、他の微細結晶粒超塑性を示す材料と同様にAshby-Verrall⁵⁾のスイッチングモデルにもとづいた説明がなされており、それに対する修正理論が種々提案されている。それらは、表面積の増大を見込んだもの⁶⁾や溶質原子の拡散による α 粒の分断を考えるもの⁷⁾、 α/β 界面の応力集中を検討するもの⁸⁾などがあり、定説といえるものは未だないようである。活性化エネルギーの数値の説明にも問題があり、粒界迂りが律速過程がどうかについても定説がない^{9) 10)}。またこれらの超塑性メカニズムを説明するために変形中の結晶成長を折り込んで修正¹¹⁾するといった工夫もなされているが、明白な理論化は未だ不十分なようである。

3. 超塑性の加工への応用

3.1. 板成形

Ti合金は緒言で述べたように、高強度、延性不足、高R値、スプリングバックが大きいなどの理由で元来、成形性が極端に悪い材料なので、航空機部材等のプレス成形は、温間または熱間領域で行われてきた。特に熱間プレス成形では、板の冷却を防ぐために金型も高温に加熱するホットプレス成形が行われてきており、この成形条件下でも一部超塑性を利用してきている。

Ti合金の超塑性においては、Fig.1に示すように全伸びが著しく増大すること、m値が大きいためにネッキング抵抗が大きくなることによる成形限界の増加という一般的な利点のほか、超塑性変形に伴うVoid形成が、Cu合金、Al合金の超塑性の場合と異なり全くないという特長を有している。この理由は、 α/β 相の強度、組成差が小さいことなど上述のTi型の超塑性機構によるものと考えられている。

一方Fig.1, 2等より明らかなように、超塑性状態のTi合金の変形応力は、1kgf/mm²以下となるのでプ

ラスチックと同様の真空成形、ブロー成形が行え、金型費用の低減も可能である。これらの成形法をFig.5¹²⁾に示す。これらの方法による成形品の例をFig.6に示す¹³⁾。Ti合金における高延性、高い m 値のために、非常に深い成形体が得られている。興味深いことは、このようなブロー成形に際して、Fig.7に示すように昇温過程での予圧によって変態超組成を利用した形で最終成形圧力を下げ、加工時間を短縮することが可能となっている。

3.2. 拡散接合

Ti合金は拡散接合能に優れ、わずか 0.2 kgf/mm^2 の応力で接合させることができる¹⁴⁾ので単独の技術としても多用されている。この接合能は、超塑性条件下で自由表面の増加が大きい条件下では、著しく増加する。この現象を利用し、プレス成形において成形と同時に接合も行おうとするのが超塑性成形/拡散接合(SPF/DB)である。これには、Fig.8に示すような種々のタイプがあり、複雑な形状のものを一体品で作ることが可能である。この方法は従来の構造品、鍛造品から削り出し等に比べて、Ti合金の鍛造性、切削性等の良くない点をカバーしているので、大幅な重量減とコストダウンが可能であるとされている。

3.3. 粉末成形

Ti合金は非常に活性で、溶解ルツボとして耐火物が使えないことなどにより、通常のカスアトマイズ法などの粉末製造技術が適用できないために、Ti合金粉末の製造には主として遠心力を利用した回転電極法が用いられている¹⁵⁾。この粉末を、HIPを用いて焼結、緻密化、形状付与を行うことにより大幅な歩留向上と、材料の均質化が図られ、さらにはFRMの製造等も研究されてきている。Ti合金粉末は急冷されるため微細組織を有するので、この焼結過程に超塑性を利用し、粉末相互の拡散接合、粒界すべりによる緻密化を図ろうとする研究は多い¹⁶⁾。

3.4. 超塑性鍛造

Ti合金は、変形抵抗の高い温度依存性、比熱が小さいことによる変形域の集中等によって鍛造の難しい材料とされている。これを回避するために金型温度をピレットと等温にし、型による冷却を防ぎつつ、低歪速度で鍛造する恒温鍛造が開発された¹⁷⁾。ここでピレットの組織を押出し等によって微細にし、かつ超塑性の発現する条件下で鍛造するのが超塑性鍛造である¹⁸⁾。Ti合金においては m 値が比較的高歪速度域まで高いので、恒温鍛造と超塑性鍛造の差異は小さい。この方法によって、変形抵抗の低下と型充填特性が改善され、通常の鍛造の数分の1から十数分の1の力で複雑形状品を鍛造することができる。ここで、微細粉末焼結体を鍛造プリフォームとして用いると、Fig.9のように動的再結晶が起こりやすいために組織が微細になり、変形抵抗が低下する。通産省工技院の次世代産業基盤技術制度の中で、この手法によって低荷重で複雑形状品を超塑性鍛造で製造する研究が行われている。試作されたモデルサイズのディスクをFig.10に示す。

4. 結言

Ti合金は板成形、バルク成形の双方に超塑性が利用されている点が他の材料と異なっており、優れた超塑性特性が十分活かされている。加工コストを低減させるために開始された超塑性の利用はすでにTi合金の加工法として不可欠の地位を占めつつあるが、今後は、超塑性を示しやすい合金の開発、各成形法要素技術、検査技術等の開発が相俟って用途が拡大してゆくものと期待される。

この報告の一部は、通産省工技院の次世代産業基盤技術制度に基づき、(財)次世代金属・複合材料研究開発協会が委託を受けた「高性能結晶制御合金の研究開発」の一環として行われたものである。

参考文献

- 1) W.A.Backofen, I.R.Turner, D.H.Avery : Trans. ASM, 57 (1964), 980
- 2) D.Lee, W.A.Backofen : Trans. AIME, 239 (1967), 1034
- 3) エム・ハ・ショルハフ, ア・イス・チネフ, : 金属材料の超塑性, 日ソ通信社, (1975), 33
- 4) C.H.Hamilton, A.K.Ghosh : Titanium 80, Proc. of 5th Int. Conf. of Ti, (1981), 1001
- 5) M.F.Ashby, R.A.Verrall : Acta Met., 21 (1973), 149
- 6) R.C.Gifkins : J. Mat. Sci., 13 (1978), 1926
- 7) J.R.Sringarn, B.Norgate, N.Ridley : Scripta. Met., 8 (1974), 159
- 8) R.Rai, A.K.Ghosh : Acta Met., 29 (1981), 283,
- 9) A.Ariel, A.Rosen : Met. Trans., 81 (1977), 1591
- 10) A.Ariel, A.K.Mukhenjee : Met. Trans. A ,13A (1982), 717
- 11) C.H.Hamilton, A.K.Ghosh : Titanium 80, Proc. of 5th Int. Conf. of Ti, (1981), 1001
- 12) D.B.Laycock : Superplastic Forming of Structural Alloy, AIME (1981), 257
- 13) 大隅, 都筑 : チタニウム協会創立30周年記念国際シンポジウム予稿集 (1983), 123
- 14) 須清, 松井, 山田 : 川崎技報, 675 (1978), 22
- 15) 西野 : 機械の研究, 35-15 (1983), 211
- 16) P.S.Gilman, G.H.Gessinger : Proc. Int. P/M Conf., (1980), 551
- 17) T.C.DuMond : Iron Age Metalworking Int., 15 (1976), 31
- 18) 日本特許公報 昭51-38665

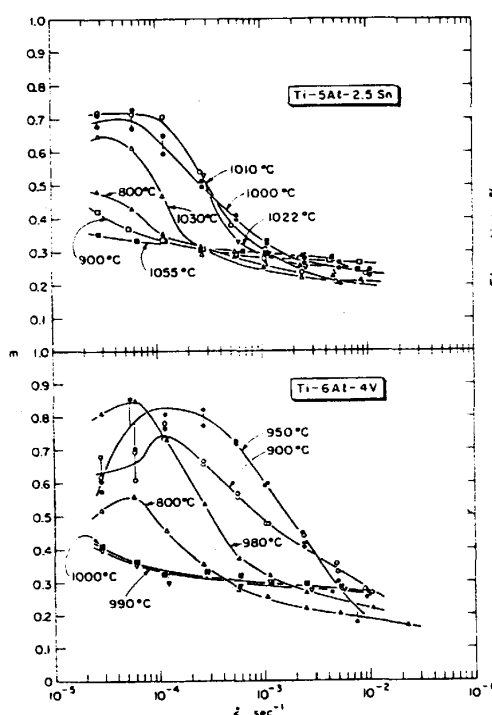


Fig.1 The strain-rate dependence of the strain-rate sensitivity index for the two principal titanium alloys at selected temperatures.

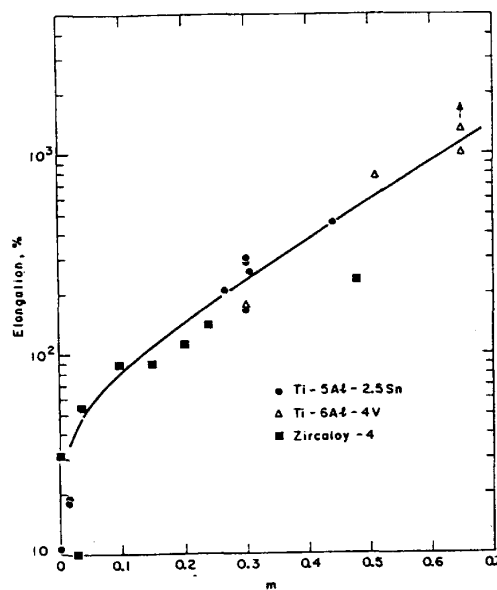


Fig.2 Total tensile elongation vs the m value corresponding to the initial strain rate over a temperature range of 25° to 1000°C.

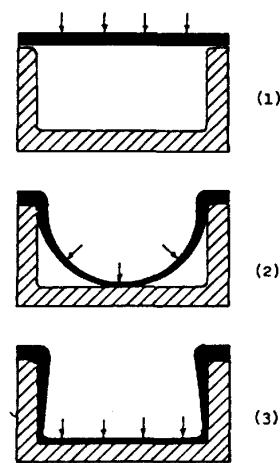


Fig.5 Simple female forming

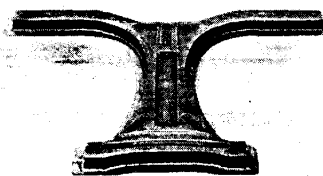


Fig.6 Integrated frame by super plastic forming

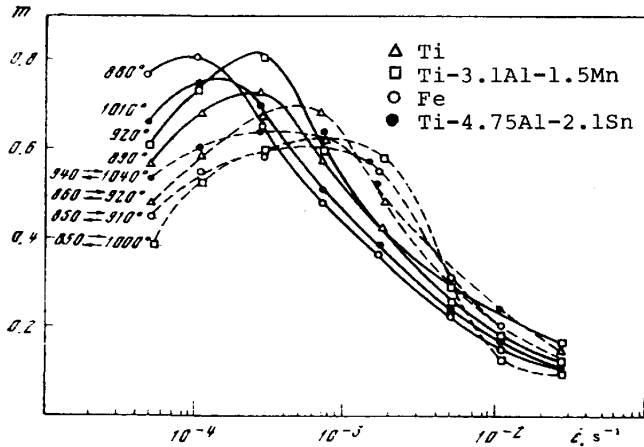


Fig.3 Strain rate dependence of the strain rate sensitivity index at isothermal or heat cycle deformation

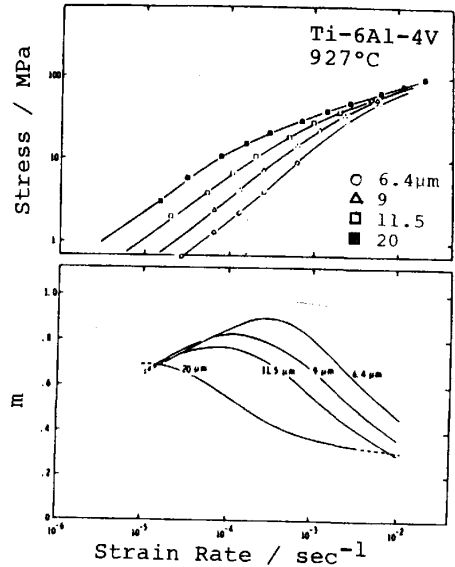


Fig.4 Stress-strain rate plots from step strain rate tests for Ti-6Al-4V alloy at superplastic temperature and the corresponding m value plots

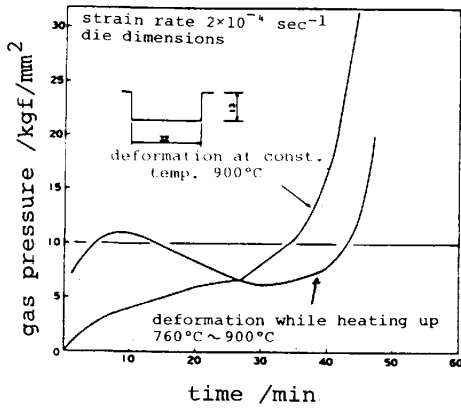


Fig.7 Gas pressure required for constant strain rate forming

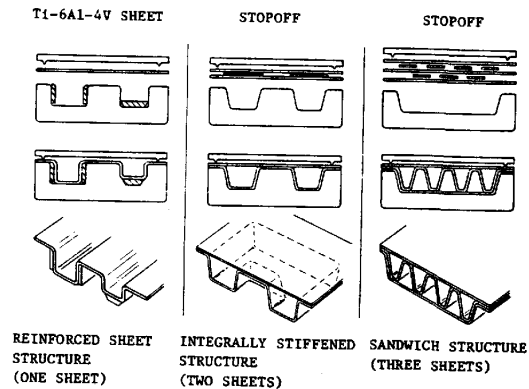


Fig.8 Three basic types of titanium SPF/DB structures

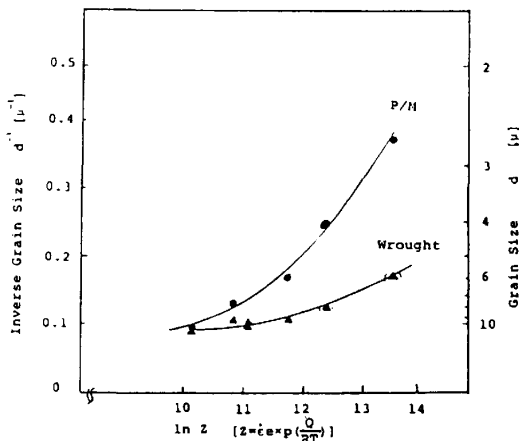


Fig.9 Zenner parameter dependence of the grain size for titanium alloy

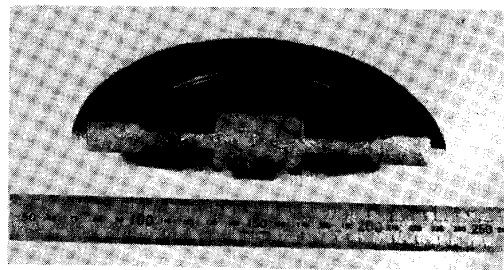


Fig.10 Miniature disk of titanium alloy forged superplastically