TiAl 金属間化合物大型溶製材の高温変形

信 木 稔* 高橋順次* 辻本得蔵*

J. Japan Inst. Metals, Vol. 53, No. 8 (1989), pp. 809-813

Elevated Temperatures Deformation of TiAl Intermetallic Compound
Prepared by Large-Scale Melting

Minoru Nobuki*, Junji Takahashi* and Tokuzou Tsujimoto*

In order to study the hot workability of TiAl, compressive tests have been conducted at the temperatures of 1200~1500 K and the strain rates of 10^{-4} ~ 10^{-1} s $^{-1}$ for vacuum arc melted materials weighing about 60 kg and plasma beam melted material weighing about 10 kg.

Maps of the flow stress and deformability for TiAl as the functions of temperature and strain rate are obtained.

The range of good hot-workability for the TiAl single phase material is between 320 and 350 MPa in flow stress. The condition for good workability becomes severer with increasing volume of Ti₃Al in the TiAl + Ti₃Al two-phase material; that is, a higher temperature and a lower strain rate are needed in comparison with the TiAl single phase material.

The poor workability in the two-phase material with the lamellar structure of TiAl and Ti₃Al results from the facts that deformation is liable to occur heterogeneously and the twinning deformation is active up to higher temperatures.

(Received May 1, 1989)

Keywords: TiAl, intermetallic compound, hot working, flow stress, deformability, isothermal forging

I. 緒 言

最近 TiAl 化合物は軽量耐熱構造用材料として実用化を期待されている。この材料の常温付近の延性は材料学的進歩と共にかなり改善された⁽¹⁾⁽²⁾。構造材料として実用するためには、溶製法や粉末や金法による均質健全なバルク材を製造することおよびそのバルク材を成形加工するための技術開発が重要となる。

TiAl 化合物の高温変形特性についてはいくつかの研究例がある⁽³⁾⁻⁽⁷⁾。しかし、TiAl 化合物溶製材の塑性加工を目的とした研究結果の報告は少ない。

本報告は TiAl 化合物の比較的大型溶製材を対象に、高温、低ひずみ速度における変形応力や変形能等の塑性加工に関する基本的な材料特性を調べた結果を述べる。

II. 試料および実験方法

本実験に用いた材料は、消耗電極アーク溶解法により2重溶解を行った直径約250 mm、質量約60 kgのインゴットおよびプラズマビーム溶解法により引下げ溶解を行った直径約100 mm、質量約10 kgのインゴットである。これらの溶解材の化学分析値を Table 1 に示す。Ti-52Al は

化学量論組成よりも若干 Al rich の TiAl (γ) 単相材であり、Ti-47Al-2V および Ti-43Al は γ +Ti₃Al (α_2) の2相材である。これらのマイクロ組織を Fig. 1 に示す。溶解インゴットに対し1470 K、21.6 ks 真空中で均質化熱処理を行った。直径10 mm、高さ13 mmの圧縮試験片を熱処理材から旋削および研削により作製した。圧縮試験は前に報告したのと同じ方法⁽⁵⁾である。すなわち、インストロン型の試験機に、ファインセラミックス工具を用いた高温圧縮治具をセットして、アルゴンガス気流中で試験を行った。

Table 1 Chemical composition of the materials.
(mass%, *: ppm)

Specimen	Al	Fe	Si	V	C	O	N*	H*	Ti
Ti-52Al	38.3	0.062	0.053	—	0.006	0.029	68	3.0	bal
Ti-47Al-2V	33.6	0.072	0.038	2.93	0.008	0.141	79	1.7	bal
Ti-43Al	29.9	0.019	0.055	—	0.008	0.010	60	3.4	bal

III. 実 験 結 果

1. 変形 応 力

Fig. 2 に応力-ひずみ曲線の1例を示す。また、Table 2 に種々の条件で圧縮を行って求めたピーク応力をまとめ

* 金属材料技術研究所 (National Research Institute for Metals, Tokyo)

て示す。変形応力はピークを示し、 α_2 相を多く含む Ti-47Al-2V, Ti-43Al では、 γ 単相組成の Ti-52Al の例と比較して、ことに低温、高ひずみ速度の条件で著しく高くな

る。そのために、高応力の試験では、セラミックス工具が破損し、大きなひずみまで変形応力を求めることは困難であった。

Fig. 1 Microstructures of as cast materials. (a) Ti-52Al, (b) Ti-47Al-2V, (c) Ti-43Al.

Table 2 Maximum flow stress and soundness of specimens obtained on compressive testing at elevated temperatures.

The numerals in the column of soundness are the true strains given for the specimens and "C" denotes crack generation at the given strain and "O" denotes sound deformation.

Temp (K)	Strain rate (s ⁻¹)	Ti-52Al		Ti-47Al-2V		Ti-43Al	
		Stress (MPa)	Soundness (strain)	Stress (MPa)	Soundness (strain)	Stress (MPa)	Soundness (strain)
1200	7.5×10^{-4}	359	1.0 O	456	0.5 C	559	0.3 C
	7.5×10^{-3}	514	0.5 C	632	0.5 C	717	0.3 C
	7.5×10^{-2}	597	0.5 C	—	—	—	—
1250	7.5×10^{-4}	265	1.0 O	371	0.7 C	410	0.5 C
	7.5×10^{-3}	414	0.7 C	509	0.5 C	583	0.5 C
	1.5×10^{-2}	423	0.5 C	572	0.5 C	—	—
1300	7.5×10^{-4}	195	1.2 O	270	0.7 C	295	0.5 C
	7.5×10^{-3}	308	1.2 O	387	0.7 C	443	0.5 C
	7.5×10^{-2}	444	0.7 C	553	0.5 C	598	0.3 C
1350	7.5×10^{-4}	149	1.1 O	181	0.7 C	202	0.3 O
	7.5×10^{-3}	235	1.3 O	241	0.7 C	293	0.5 C
	7.5×10^{-2}	347	0.7 C	449	0.7 C	493	0.5 C
1400	7.5×10^{-4}	111	1.2 O	116	1.0 O	117	0.5 C
	7.5×10^{-3}	183	1.2 O	207	0.7 C	223	0.5 C
	7.5×10^{-2}	286	1.2 O	360	0.7 C	350	0.5 C
1450	7.5×10^{-3}	142	1.3 O	130	1.0 C	155	0.7 O
	7.5×10^{-2}	238	1.0 O	244	0.7 C	267	0.5 O
	7.5×10^{-1}	378	0.7 C	399	0.7 C	411	0.3 C
1480	1.0×10^{-3}	76.0	1.2 O	73.6	1.3 O	47.8	1.3 O
	1.0×10^{-2}	129	1.2 O	129	1.3 C	130	1.2 O
	1.0×10^{-1}	222	1.2 O	231	0.7 C	232	0.7 C

Fig. 2 Relation between true stress and strain for TiAl.

2. 変形能

高温変形は、いずれの材料も低温、高ひずみ速度の条件では、不均一変形を伴う座屈変形とせん断型の割れを生じた。一方高温側では主として粒界割れが起こった。Ti-47Al-2V および Ti-43Al の変形は、Ti-52Al と比較して、不均一変形を生じ易く、ことに低温、高ひずみ速度の試験では、座屈変形がしばしば見られた。

一般に変形能の評価は、加工ひずみ速度で引張試験を行い、そこで求めた破断絞り値で行われている⁽⁸⁾。従って、圧縮試験で変形能を定量的に評価することは困難であるが、ここでは、圧縮試験後の試験片の側面に割れを生じたか否かで変形能を定性的に評価した。

各種の条件で圧縮試験を行い、そのときの圧縮真ひずみ

と変形材の健全性について調べた結果をまとめて Table 2 に示す。同表で O 印は健全な場合、C 印は割れを生じた場合を示す。

3. 変形材の組織

高温変形材の組織観察例を Fig. 3 に示す。Ti-52Al では 1450 K, $7.5 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ で真ひずみ 0.8 まで変形した場合全面に微細な再結晶組織が見られる(a)。一方 Ti-47Al-2V および Ti-43Al では同温度でさらに低ひずみ速度で変形した例(b), (c)に示すように、(a)の例と比較して層状組織が多くみられ、再結晶は全面には生じていない。しかし、部分的には $6 \mu\text{m}$ 以下の極めて微細な再結晶組織が見られた。Ti-52Al の場合には、完全に再結晶を生ずる条件でも Ti-47Al-2V および Ti-43Al では、局所的な粒界すべりと多くの双晶変形が見られた。

IV. 考 察

TiAl 化合物の高温塑性加工において基本的特性である変形応力および変形能に対する組成および変形温度、ひずみ速度の影響について以下に検討した。

1. 変形応力に及ぼす変形条件および組成の影響

TiAl 化合物の高温における変形応力(σ)と温度(T)、ひずみ速度($\dot{\epsilon}$)との関係は式(1), (2)に示すように、Zener-Hollomon パラメータ(Z)を用いた双曲線関数の形式でよく表示できることを前に報告した⁽⁵⁾。

$$Z = \dot{\epsilon} \exp(Q/RT) \quad (1)$$

$$Z = A[\sinh(a\sigma)]^n \quad (2)$$

Fig. 3 Microstructures of deformed specimens.
(a) Ti-52Al deformed at 1450 K, 0.075 s^{-1} to a strain of 0.8, (b) Ti-47Al-2V 1450 K, 0.0075 s^{-1} , 1.20, (c) Ti-43Al 1450 K, 0.0075 s^{-1} , 1.2.

Table 3 Material constants for flow stress of TiAl.

Specimen	Q (kJ/mol)	A	n	α (MPa $^{-1}$)
Ti-52Al	398	6.33×10^{12}	3.74	4.56×10^{-3}
Ti-47Al-2V	465	3.60×10^{15}	3.60	3.61×10^{-3}
Ti-43Al	528	1.67×10^{17}	2.94	4.95×10^{-3}

Fig. 4 Relation between flow stress and Z for TiAl. (a) Ti-52Al, (b) Ti-47Al-2V, (c) Ti-43Al.

ここで、 Q は変形の活性化エネルギー、 A , α , n は材料定数、 R は一般ガス定数である。

本実験で求めたピーク応力と温度、ひずみ速度の関係もこの式(1)、(2)で表示できるものとすれば、以下の方法で各材料定数が求められる。すなわち、式(2)はその両辺を対数表示すると直線関係となり、実験結果をこの関係で表示したときその偏差が最小となるように、各材料定数を差分法で求めることができる。

この方法で本実験の結果から各材料定数を求めた結果をTable 3に示す。また、Fig. 4はこれらの材料定数を用いて、実験結果を、変形応力と Z パラメータの関係で示す。同図で、実験値との相関係数はいずれも0.95以上であることから、実験範囲内でTiAl化合物のピーク応力は(1)、(2)でよく表示できる。

ここで求めた変形の活性化エネルギーは、 γ 単相材のTi-52Alと2相材では異なる。すなわち、変形の活性化エネルギーは α_2 相の量に強く依存し、その量が多くなる程大きい値となる。このことから、変形応力に対する温度変化の影響は α_2 相が多い程大きいと推定される。

2. 変形能に及ぼす変形条件および組成の影響

Fig. 5は、変形能に関する実験結果を温度とひずみ速度の関係で示す。真ひずみ1.0以上健全な変形が可能となる条件は同図に示す点線から高温、低ひずみ速度領域であ

Fig. 5 Stress and deformability maps for TiAl. Solid lines represent the flow stress indicated by the numerical value (MPa) at the end of each line. The numerical values attached to the symbols denoted the true strains given for the specimens. The specimens shown by $\circ$, $\bullet$ were sound at the given strain and those by $\square$, $\triangle$ had cracks. Below the dotted line, the specimens can be deformed soundly greater than 1.0 by a true strain.

る。なお、同図には変形応力との関係を検討するために、IV. 1.で求めた変形応力マップを重ねて示している。この図から、真ひずみ1.0以上健全な変形が可能な限界条件はTi-52Alの場合には変形応力が320~350 MPaとなる温度と、ひずみ速度であることがわかる。一方 α_2 相を多く含むTi-47Al-2VおよびTi-43Alでは、変形応力が100~140

MPa となるのが限界条件であり、この場合には塑性加工に際する、温度と、ひずみ速度は Ti-52Al よりも厳しくなる。この原因は、結果において述べたように、結晶粒内は一面に γ/α_2 層状組織となっているために不均一変形を生じ易いこと、さらに、双晶変形が高温まで活動するために動的再結晶が十分進行しないことによるものと考えられる。

V. 結 言

TiAl 化合物大型溶製材の高温塑性加工の可能性を調べる目的で消耗電極アーク溶解材およびプラズマビーム溶解材を用いて高温、低ひずみ速度における変形応力および変形能等の特性を調べ、以下の結果を得た。

(1) 変形応力は、 γ 単相あるいは α_2 相を多く含む γ/α_2 2 相の材料でいずれの場合も Zener-Hollomon パラメータを用いた双曲線関数の形式で精度よく表示できた。

(2) 変形能は、真ひずみ 1.0 以上健全な変形が可能な条件は、変形応力が γ 単相材で 320~350 MPa 以下、 α_2 を多

く含む γ/α_2 2 相材では、100~140 MPa 以下である。

(3) 高温塑性加工は γ 単相材よりも α_2 相を多く含む γ/α_2 2 相材の方がより厳しい条件となる。

文 献

- (1) M. J. Blackburn and M. P. Smith: U. S. Patent, No. 42946 15(1981).
- (2) 橋本健紀, 土肥春夫, 辻本得蔵, 中野 理, 信木 稔: 日本特許第1395560号(1987).
- (3) J. B. McAndrew and H. D. Kessler: Trans. AIME, (1956), 1348.
- (4) H. A. Lipsitt, D. Shechtman and R. E. Schafritz: Metall. Trans., 16A(1975), 1991.
- (5) 信木 稔, 橋本健紀, 辻本得蔵, 浅井義一: 日本金属学会誌, 50(1986), 840.
- (6) S. Mitao, Y. Kohsaka and C. Ouchi: Proc. THERMEC-88, 2(1988), 620.
- (7) [技]スーパーチタン合金分科会: チタニウム・ジルコニウム, 36(1988), 81.
- (8) C. M. Sellars and W. J. McG Teggt: Int. Metall. Reviews, 17(1972), 1.