Ti-Fe-Al 合金の機械的性質, 加工性および熱處理性について

草道英武* 八木芳郎* 湯河 透* 戸田秀徳* 宮本一雄*

Hidetake Kusamichi, Yoshiro Yagi, Toru Yukawa, Hidenori Toda and Kazuo Miyamoto : Studies on the Mechanical Properties, Workability and Heat Treatment of Ti-Fe-Al Alloy.

By means of consumable double melting method we produced a titanium ingot containing about 2 % each of iron and aluminium, whose structure is uniform and sound. As to mechanical properties, its tensile strength and elongation are about 90 kg/mm² and 20 % at room temperature, respectively, and consequently this product shows a satisfactory result as high tensile alloy. Its tensile strength and elongation at 600° rise to 30 kg/mm² and 30 %, respectively, and at moderate temperature it shows excellent heat resistance.

As to workability, it is easily subjected to hot forging and rolling. Furthermore, even in the case of 50 % reduction by cold rolling it can obtain the tensile strength of 130 kg/mm², and in the case of reduction up to 80 % by cold drawing the tensile strength becomes 150 kg/mm². With regard to heat treatment property, it shows a structure of $\alpha + \beta$ at room temperature, and in the case of water quenching from the temperature of 1,000° it shows the structure of α' . As a result of isothermal transformation test at the temperature ranging from 400° to 950°, α structure appears in the quenching structure, while in quench aging test an unknown precipitation appears in the structure at the temperature of about 500°.

(Received October 4, 1954)

I. 緒 言

工業用チタン合金を大別すると、常温の組織が (1) α -Ti のみのもの (2) β -Ti のみのものおよび (3) α -Ti + β -Ti 組織を呈するもの、3 種類となりそれぞれに利点があるが、(3) のチタン合金は熱處理性にその特長が認められる。著者等はこの種合金の代表である 2 Fe-2 Cr-Ti 合金および 2 Fe-2 Al-Ti 合金を熔製しその機械的性質、加工性および熱處理性について研究したが、こゝには後者の合金について述べる。

II. Ingotism

原料として使用したスポンジチタン、アルミニウムおよび純鐵の化学成分を示すと Table 1 の通りである。この

原料を適當に配合していわゆる消耗電極式二重熔解法を應用して約 15 kg の鑄塊を熔製した。この鑄塊の各部分から試料を採取し、化学分析を行つたがその結果は Table 2 に示す如く均一組成を示している。なお試料の採取箇所も Table 2 に示した。次に鑄塊内部の缺陷の有無を検するために既報⁽¹⁾の如く sperry reflectoscope を使用し 2.25 MC の波長で超音波探傷試験を實施した。縦方向、横方向共に缺陷波の存在せぬことを確認した⁽¹⁾。

III. 機械的性質

2 Fe-2 Al-Ti 合金の常温における機械的性質を Table 3 に示す。抗張試片は JIS-B 7702-4 號試片を、またシャルピー試片は JIS-B 7703 に定められたものを使用した。上記試片は何れも鑄塊を鍛造して丸棒または角棒とし機械

* 株式會社神戸製鋼所

(1) 草道, 八木, 湯河, 宮本, 輕金屬, No. 12 (1954), 118.

加工後抗張試片は 5×10^{-5} mm Hg 真空中で 700°C 1 hr 保持 600° において抗張力 30 kg/mm^2 であるが、伸びは著しく増大して 100 % である。しかし 800°C における高温強度は小さい。これは熱間加工の容易性を示すものである。

Table 1 Chemical composition of raw materials.

Raw materials	Chemical composition (wt %)								
	C	Si	Fe	Al	Mn	Mg	Cl	N ₂	O ₂ * H ₂ *
Sponge Ti	0.03	<0.10	0.019	—	<0.02	0.03	0.04	0.027	0.05
Aluminium	—	—	0.01	99.9	—	0.02	—	—	—
Iron	0.08	0.02	99.0	—	0.4	—	—	—	—

* National research corporation vacuum fusion gas analysis apparatus was used for analyses of oxygen and hydrogen.

Table 2 Chemical compositions at seven parts of Ti-2Fe-2Al alloy ingot (weight 15kg)

	C	Fe	Al	Si	Mg	Cl	Mn	N ₂
1	0.055	2.04	1.79	<0.10	<0.01	<0.01	<0.02	0.030
2	0.045	2.04	1.86	"	"	"	"	0.031
3	0.057	2.04	1.87	"	"	"	"	0.030
4	0.020	2.16	1.80	"	"	"	"	0.027
5	0.040	2.16	1.75	"	"	"	"	0.024
6	0.048	2.10	1.79	"	"	"	"	0.031
7	0.031	2.16	1.76	"	"	"	"	0.030
Average	0.042	2.10	1.80	<0.10	<0.01	<0.01	<0.02	0.029
Deviation(+)	0.015	0.06	0.07	—	—	—	—	0.002
Deviation(—)	0.022	0.05	0.05	—	—	—	—	0.005

Table 3 Mechanical properties of commercially pure titanium, and Ti-2Fe-2Al alloy at room temperature.

Material designation	Grade	Ultimate tensile strength kg/mm ²	0.2 % off set yield strength kg/mm ²	Y. S. / U. T. S. %	Elongation in 50 mm %	Reduction of area %	B H N	Charpy impact value kg/cm ²
KS-50	Commercially pure, high ductility	43	30	70	40	55	120	22
KS-70	Commercially pure	60	49	82	28	50	170	12
Ti-2Fe-2Al	Alloy grade	91	79	87	21	48	265	4.5

Fig. 1 Mechanical properties at various temperatures.

高温における強度を Fig. 1 に示した。各温度に 30 min 保持後その温度で試験した。温度の上昇とともに強度は次第に低下するが、 600°C においてもなお 30 kg/mm^2 の抗張力を有し、また伸びは 30 % に過ぎない。従つて 2 Fe-2 Al-Ti 合金は中温度の耐熱合金として優れていることが認められる。因みに 2 Fe-2 Cr-Ti 合金においては

持後爐冷した。

Table 3 には比較のため工業用高純度チタン (KS-50) および工業用純チタン (KS-70) の機械的性質をも併せ記した。常温における 2 Fe-2 Al-Ti 合金の機械的諸性質は中程度の強力実用合金として満足すべきものである。

Fig. 3 はシャルピー値の温度による変化で各温度に試片を 30 min 保持して試験した。

Fig. 2 Ratio of U. T. S. / specific gravity at various temperatures.

IV. 加工性
2 Fe-2 Al-Ti 合金の高温抗張性質は既報の通り 800°C 以上においては 10 kg/mm^2 以下となるので 800°C とすればよい。また酸素および窒素の吸収に基づく脆化現象その他の条件から、鍛造最高温度は 950°C が適當と考えられる。次に冷間圧延および冷間引抜試験の結果求めた加工性は次に示す通りである。

1. 冷 間 圧 延

鑄塊を鍛造して $10 \times 100 \times 150 \text{ mm}$ のシートバーを製作し、これを約 2 mm 厚に熱間圧延した。熱圧後の試料を苛性ソーダバスおよび硝酸を用いて脱スケールし、 $5 \times$

10⁻⁵mm Hg 真空中で 700° 1 hr 保持後爐冷して冷間壓延素材とした。冷間壓延加工率と抗張力, 耐力, 伸び, 表面

Fig. 3 Charpy impact value at various temperatures.

Fig. 4 Effect of cold rolling on the mechanical properties of Ti-Fe-Al alloy.

Fig. 5 Effect of cold rolling on ratio Y.S./U.T.S.

Fig. 6 Effect of cold drawing on the mechanical properties of Ti-Fe-Al alloy.

に増大したが, 0.9% Cが混入したものは 2 Fe-2 Al-Ti

合金と同様の傾向にあることが確認されている。なお本試験は ASTM 薄板試験片を使用して実施した。

2. 冷間伸線

鋳塊を鍛造して 10×10 mm 棒としスエージャーにて直径 6 mm の線を作製し, これをセンターレス・グラインダーにて表面研磨して傷取り後, 直径 3 mm まで冷間引抜加工して焼鈍しこれを素材とした。伸線加工率と抗張力, 伸び, 断面収縮率および捻回値との関係を Fig. 6 に示した。抗張試験は 50 mm の標点距離で行い, 捻回値は 100×D の値である。伸線は 80% まで可能であった。抗張力は加工とともに増加 (最大 150 kg/mm²) する。なお伸線諸条件は既報の通りである⁽¹⁾。

V. 熱処理性

前述の (3) に属するチタン合金の中, 共析型変態を與える元素すなわち Fe, Cr および Mn などを含んだ合金の熱処理性については多くの研究報告がある。しかし α-チタンに完全に固溶する Al と上記各元素とを同時に含んだチタン合金の熱処理性は複雑である上に研究報告は少い。著者等の 2 Fe-2 Al-Ti 合金の熱処理性に関する本研究結果は十分に解明出来なかつたが, 爾後の研究の参考となると思われるので簡単にここに報告することとした。

1. 試料および装置

熱処理試験材として鋳塊を鍛造, スエージャー加工して 7 mm 直径とし, 表面をセンターレスグラインダーにて研磨し約 10 mm 長に切斷した。これを 10⁻⁵mm Hg 真空中にて 700° 1 hr 保持後爐冷した。この硬度を測定しすべて一定硬度であることを確かめて試験に供した。検鏡および硬度測定は試料の横断面を約 1 mm 研磨して実施した。加熱はすべて 10⁻⁵mm Hg 真空中で行い, 恒温變態, 焼戻しには 400° 以上は鉛バス 300° は錫バス, 200° は油バスを使用した。また腐蝕はすべて硝酸の混酸を用いた。

2. 焼入実験

1100° 以下 100° おきに 200° まで試料を 1 hr 真空中に保持後水焼入および空冷した。顯微試組織を Photo. 1

1000×60' W. Q.
Photo. 1

950×60' W. Q.
Photo. 2

~5 に示す。1100° および 1000° より水焼入した組織は

900°×60' W.Q. 800°×60' Quenched in water.
Photo. 3 Photo. 4
Photo. 1~Photo. 4 Microstructure of alloys
quenched in water.

α' または残留 β である。950° では同様の組織の内部に α が出現し、温度の低下とともに次第に組織が微細化し α

700°×60' F.C.
Photo. 5 Microstructure of
alloy annealed

が増加する。一般に焼鈍組織は Photo. 5 に示す通り $\alpha + \beta$ 組織である。各温度からの焼入硬度は Fig. 7 に示す如く α が減少し始めると急激に硬度が上昇する。1100° より焼入したものは

Fig. 7 Effect of solution temperature on hardness of Ti-Fe-Al alloy.

1000°×60'→950°×30' W.Q. 1000°×60'→950°×100' W.Q.
Photo. 6 Photo. 7
1000° より焼入したものより硬度が低い。これは 2 Fe-2 Cr-Ti 合金および 4 Al-4 Mn-Ti 合金と同一

Fig. 8 Effect of holding temperature on hardness in isothermal transformation treatment.

1000°×60'→850°×1' W.Q. 1000°×60'→600°×10' W.Q.
Photo. 8 Photo. 9

Photo. 6~Photo. 9 Microstructure of alloys isothermally transformed at indicated temperature.

現象である。

3. 恒 温 変 態

1000° 1 hr 保持して試料を完全 β 組織とした後 950~400° の各温度に焼入れ、それぞれ 30 sec, 1 min, 10 min および 100 min 保持して水焼入した。950° の恒温変態では 30 sec で相当量の α が析出する。100 min 保持のものでは α の成長が認められる。これらの組織を Photo. 6, 7 に示した。焼入温度が低くなるに従って組織は微細化し α 量は多くなるが、700° 以下では組織がさら

Fig. 9 Effect of holding time on hardness in isothermal transformation treatment.

に小さくまた析出量は減少している。Photo. 8, 9 にこれを示す。これらの組織を反射偏光顕微鏡で見ると試料の回

Fig. 10 Effect of holding temperature on hardness in high temperature aging.

Fig. 11 Effect of holding time on hardness in high temperature aging.

恒温変態温度と硬度の関係は Fig. 8 に示す通り 950° 以下では漸次焼入硬度より低くなり、850~700° は同一低硬度を與える。さらに低温処理試料は硬度が次第に上昇する。この傾向は (3) に屬するチタン合金に共通した特質と考えられる。時間變化に伴う硬度の變化を Fig. 9 に示した。高温部では時間とともに硬度が低下する傾向があり、低温部で

は未知物質の析出に基く硬度上昇の現象が認められる。

4. 焼入試片の高温時効

1000° 水焼入試片を再び 200°, 300°, 400°, 500° および 600° の各温度にそれぞれ 1min, 10 min, 100 min 保持して硬度と時効温度との關係を求めた。Fig. 10 にその結果を示す。500° 附近で未知物質の析出現象が認められ、600° では軟化現象が認められる。組織には明瞭な變化は未だ認められない。Fig. 11 に時効時間と硬度との關係を示す。

VI. 結 言

工業用チタン合金として Ti-2 Fe-2 Al 合金を熔製しその鑄塊より機械的性質加工性および熱処理性について調査したの結果を得た。

(1) 消耗電極式二重熔解法を應用してチタン合金を熔解した結果、均一かつ欠陥のない良質鑄塊が得られた。

(2) 機械的性質は中程度の高力合金として満足すべきもので、高温強度は 600° までは優れた強度を示す。

(3) 熱間加工性は良好である。冷間加工性も良くシートは 50 % 冷間壓延により 130 kg/mm²、線は 80 % 冷間伸線により 150 kg/mm² の値が得られた。

(4) 常温で $\alpha + \beta$ の組織を示し、1000° 以上の温度からの焼入れによつて焼入組織を呈し高い硬度を示す。950° 以下 400° 以上の恒温変態試験では焼入組織に α 相の析出が認められた。線入試料の高温時効試験では 500° 附近で未知の相の析出があることを示した。

終りに本研究論文の發表を許可された會社上司および直接試験の指導を賜つた高尾善一郎部長、高橋孝吉課長に對して厚く感謝の意を表する次第である。