タングステン繊維を含むアルミニウムの高温強度について*

三 浦 維 四** 本 間 久 夫**

Ishi Miura and Hisao Honma: On the Strength of Tungsten-Fiber-Reinforced Aluminum Composites at High Temperatures. In the present study, tensile and creep tests were carried out on aluminum composites containing continuous or discontinuous tungsten fiber at high temperatures up to 545°C. The specimens containing continuous tungsten fiber (10 vol% and 20 vol%) showed very large values of tensile strength at 300°C and 500°C, however the specific strengthening effect of the discontinuous-tungsten-fiber-reinforced aluminum composites were considerably smaller than that of the fiber itself.

The minimum creep rate of the composite containing 20 vol% continuous tungsten fiber was estimated at about $10^{-4} \sim 10^{-5}$ %/hr under a load of 6.06 kg/mm² at 350°C, and the minimum creep rate-temperature curves on the discontinuous fiber were determined under a load of 1.43~3.05 kg/mm². By these results, for example, the minimum creep rate for the matrix was 6.0×10^{-2} %/hr under a load of 2.00 kg/mm² at 350°C, however the minimum creep rate for the composite containing 15 vol% discontinuous tungsten fiber (diameter=25 μ) was 1.4×10^{-3} %/hr under the same condition.

(Received December 3, 1965)

I. 緒 言

粒子分散硬化合金においては、粒子が強さの改善に役立っていることが知られている。この場合、粒子の代りに繊維を用いたらどのような影響が生ずるかは大いに興味あることである。この点を明らかにする目的で著者らは前報⁽¹⁾においてタングステン繊維がアルミニウムの常温における機械的性質にどのような影響をおよぼすかについて述べた。この報告ではさらにタングステン繊維が高温における引張性質およびクリープ性質にどのような影響を与えるかについて調べた結果をのべる。

II. 実験方法および結果

この報告で採用した試験片のつくり方および素材は前報⁽¹⁾で述べたのと同じである。前報と異なる点は耐熱アルミニウム合金 18S を比較のため使用したことで、この合金は古河電工 K K の好意によつて供給されたもので、十分に焼鈍された状態で使用されている。さて、上記の方法でつくった複合体はアルミニウム箔を主素材としているので、アルミナが層状にマトリクス中に分布している状態にあり、このような複合体についてはすでにその高温性質その他について報告^{(2)~(4)}されており、アルミナが存在するこ

とにより普通のアルミニウムとはかなり異なつた高温性質を示すことがわかつている。加えられたタングステン繊維の直径は 500 μ , 200 μ および 25 μ の 3 種類で、その量は 20 vol% (以下すべて容量 % で示す) までである。タングステン繊維は 7 μ の厚さをもつアルミニウム箔中にはほぼ等間隔になるようにあらかじめ計算された量だけ配置され、このようなサンドイッチを 500°C で数回圧延をくり返すことによつてアルミニウム箔とタングステン繊維およびアルミニウム箔同志を接着させ、いわゆるボンド状態をつくり出した。この場合圧延によつて 500 μ 径の繊維のときは連続、200 μ , 25 μ のときは非連続となり、後者の場合はおよそ 75% の圧延加工度が与えられ、そのときの繊維の aspect ratio l/d (l および d はそれぞれ繊維の長さおよび直径) の値は同じ条件で比較的少量の繊維を含む試験片の X 線透過試験から得られた結果によると、ともに 8 である。これらの複合金について、前報^{(2)~(4)}と同じ装置によつて高温引張試験およびクリープ試験を行なつた。このときの試験片の寸法は Fig. 1 に示すとおりで A は引張試験用、B はクリープ試験用のもので、その厚さはともにおよそ 1 mm である。

Fig. 2 は各種の温度における真応力-ひずみ曲線について、代表的なものを示したものである。参考のため、7 μ のアルミニウム箔だけを圧延してつくつたものおよび 18S の曲線も示した。これらの結果を温度と引張強さおよび降伏応力 (0.2% 耐力) の関係についてまとめたのが Fig. 3 で

** 東京医科歯科大学医用器材研究所 (Tokyo Medical and Dental University, Institute for Medical Engineering, Tokyo)

* 1965 年 4 月本会東京大会に発表; 金属組織と機械的性質の関係について (第 9 報)

(1) 三浦, 本間: 本誌, 31 (1967), 475.

(2) 三浦, 佐々木, 本間, 太田: 本誌, 30 (1966), 659.

(3) 三浦, 佐々木: 本誌, 30 (1966), 662.

(4) 三浦, 佐々木: 本誌, 30 (1966), 1099.

ある。図中の実線は引張強さ、点線は降伏応力を示している。この図の横軸は温度の逆数、縦軸は応力の対数として

場合よりかなり強く、また耐熱アルミニウム合金として知られている 18 S の値 (0.6 kg/mm²) よりもかなり強いこと

Fig. 1 Specimens for tensile test (A) and creep test (B). (Thickness of specimen A and B=1 mm, Dimension: mm).

Fig. 2 True stress-elongation curves of the tungsten-fiber-reinforced aluminum composites.

とられており、またアルミニウムの融点が参考のため記されている。この図の示すところによると、20%の500 μ径のタングステン繊維を含む連続繊維強化複合体の高温強度はきわめて大きく、試験温度 500°C の場合常にチェックすべりをおこすため、正確な値はわからず、図中点線をもつて示されているが、10.5 kg/mm² 以上の強さと考えられ、また降伏応力もかなり大きく 8.0 kg/mm² 以上と考えられる。これらの値は 500°C におけるアルミニウム基合金としてはきわめて大きな値といえることができる。また、非連続繊維のときは連続の場合ほど大きな強化は示されないが、かなりの強化が行なわれることが認められる。たとえば、20%の25 μタングステン繊維を含む材料は 500°C で 2.2 kg/mm² であるが、この値はタングステン繊維を含まない

Fig. 3 Relations between tensile or yield strength and test temperature.

がわかる。

著者らは前報⁽¹⁾において、常温における非連続繊維強化複合体の強さについて検討を行なつたが、その場合と同じく高温においても繊維が応力負担の役割りを演ずると考えると、複合体の強さは常温におけると同様に繊維の容積比と比例関係をもつことになる。Fig. 4 はこの状況を示したもので、この曲線は高温においても上記の考えが成立することを示すものである。

この関係を式で示せば

$$\sigma_c = \kappa \sigma_f V_f + \sigma_m' (1 - V_f)$$

ここに、 σ_c =複合体の引張強さ、 V_f =繊維の容積比、 σ_f =繊維の引張強さ、 σ_m' =複合体の伸びに等しい伸びをマトリクスに与えたときのマトリクス中の応力、 κ =非連続

Fig. 4 Effect of the amount of W fiber on the tensile strength of Al-discontinuous W fiber composite at high temperatures. (300°C and 500°C=testing temperature).

繊維強化係数でこの場合の σ_m' の値はマトリクスの引張強さ σ_m とほぼ同じである。一般に σ_m' は繊維の伸びに等しい

伸びを与えたときのマトリクス中の応力として求めるのが普通であるが、複合体の応力-ひずみ曲線は繊維とマトリクスのそれぞれの応力-ひずみ曲線の合成として考察されるように、複合体の伸びは繊維の量が少ないとき繊維自体の伸びにほぼ等しいとしてもそれほど差はないと考えられる。

さて、非連続繊維のとき、 $\kappa \cdot \sigma_f$ の値は Webb⁽⁵⁾らが比強化効化値として求めた値となり、この値を σ_f' としてしらべてみると、500°C では 25 μ 径のとき 4.2 kg/mm²、200 μ 径のとき 3.1 kg/mm²、300°C では 25 μ 径のとき 7.4 kg/mm²、200 μ 径のとき 6.1 kg/mm² である。これらの値は 500°C および 300°C における 200 μ および 25 μ 径のタングステン繊維の引張強さ σ_f と密接な関係を持つことが考えられるが、実際にこれらの σ_f の値を 300°C および 500°C で求めてみたとき、すべてチャック切れに終り、高温における σ_f の値は求めることができなかった。したがって、これらの場合の $\kappa = \sigma_f' / \sigma_f$ の値および $1 - l_c / 2l$ (ここに l および l_c は繊維の長さおよび臨界長さ) の値⁽⁶⁾を求めることができなかったが、25 μ 径の方が 200 μ 径の場合より σ_f' の値が大きいことは前報⁽¹⁾で述べたように繊維の径の小さい方が l_c の値が小さいためと考えることができる。

この研究で得られた非連続繊維の aspect ratio の値は 8 で比較的小さい値であるが、この場合でも強化がかなり有効に行なわれたことは 300°C あるいは 500°C におけるアルミニウムの引張強さの低下がかなり大きいのに、タングステン繊維の低下率が小さいためと考えられ、この場合のマトリクスが前述のように Al-Al₂O₃ 複合体となっているため、その差がそれほどではないが同程度の純度の純アルミニウムの高温強度と比べてみると、その状況がよくわかる。たとえば前報⁽⁴⁾で求めた値についてしらべてみると 500°C で 99.8% の純度のアルミニウムの引張強さ σ_{Al} は 0.5 kg/mm²、300°C で約 2.0 kg/mm² である。

いま、合金製造に関するまづたく実用的な問題として純アルミニウムの高温における強化比率の問題を採り上げてみると、20% の 25 μ 径のタングステン繊維のときの強化の割合 σ_c / σ_{Al} の値は 500°C、300°C のとき、それぞれ 4.2 および 2.6 である。

つぎに、aspect ratio l/d が ∞ のとき、つまり連続繊維のときは κ の値は 1 となり、強化は最も有効に行なわれ、 σ_c / σ_{Al} の値は他のいわゆる添加元素による強化の場合をはるかに凌ぐことが示されている。18 S は比較的高温強化の割合が大きい材料として知られているが、20% の連続タングステン繊維を含む複合体のとき、 σ_c / σ_{Al} の値は 500°C および 300°C でそれぞれ 21.0 および 8.0 (18 S のとき、それぞれ 1.2 および 2.0) でその値がきわめて大きいことが知られる。500°C における連続繊維のときの σ_f' の値を求めてみると、55 kg/mm² という値が得られ、これは 500 μ

径のタングステン繊維のときには実測値を求めることができ、このときの実測値に一致する。この値は他の文献から

Fig.5 Relations between elongation and time under creep test for discontinuous-tungsten-fiber-reinforced aluminum composites.

Fig.6 Relations between elongation and time under creep test for discontinuous-tungsten-fiber-reinforced aluminum composites.

見ても妥当な値^{(7)~(9)}で、このことは高温における強化機構は常温の場合と変わらないことを示すものである。

つぎにクリープ試験による測定値を示したのが Fig.5 および Fig.6 である。Fig.4 には 3 kg/mm² 前後の荷重のときの曲線、Fig.5 には 25 μ 径のタングステン繊維を 15% 加えた試料についての曲線が示されている。これらの曲線はいわゆる標準的なクリープ曲線とほぼ似た形をとっているが、定常状態があまり明瞭でないところに特徴がある。以上は非連続繊維の場合であるが、Fig.7 には連続繊維の場合の曲線を示した。この場合には荷重が小さいと伸びの変化が測定にかからず、大きいときは試験片にチャックすべりが生じ、その中間の荷重を得ることが大変困難であった。Fig.7 はこのような条件にうまく適合した試験から得られたいくつかの曲線の中から代表的なものを示したものである。前に示した非連続繊維の場合に比べて荷重が

(5) W.W.Webb et al: Acta Met., **6** (1958), 462.

(6) V.F.Zackay 編: High Strength Materials (1965), p.578.

(7) 梶山, 鈴木: 粉末冶金とその応用 (1959), p.204.

(8) D.W.Petrusek: Trans. AIME, **236** (1966), 887.

(9) D.W.Petrusek et al: NASA Technical Note TN D-3073.