

## Исследование прочности и пластичности слоистого композиционного материала системы Ti–Nb в диапазоне температур 290...1700 К

Н. П. Рудницкий

Институт проблем прочности НАН Украины, Киев, Украина

*Описаны методики испытаний и определены температурные зависимости (290...1700 К) механических характеристик при растяжении 9- и 13-слойных композиционных материалов системы Ti–Nb с равным объемным содержанием компонентов и титанового сплава ВТ6С. Установлено, что материалы с большим количеством слоев являются более прочными, а среди материалов с одинаковым количеством слоев необходимо выделить материал с большей степенью обжатия. Полученные величины предела прочности хорошо согласуются с определенными по уравнению аддитивности, за исключением области действия динамического деформационного старения.*

**Ключевые слова:** прочность, пластичность, растяжение, температура, металлические композиционные материалы.

**Введение.** Современное развитие космической и авиационной техники требует создания и экспериментального изучения материалов с высокими прочностными характеристиками и малым удельным весом, работающих в условиях высоких температур. К таким материалам относится многослойный металлический композиционный материал системы Ti–Nb, полученный путем сваривания и используемый для оболочечных конструкций. В качестве компонентов служат сплавы ниобия ВН-2АЭ и титана ВТ6С.

**Материалы и методика исследования.** В практике промышленного производства жаропрочных слоистых металлических композитов широко применяется сплав ВН-2АЭ системы Nb–Mo–Zr. Этот сплав, легированный молибденом и цирконием, относится к жаропрочным свариваемым сплавам ниобия (легирующие элементы: Mo – 7,0%; Zr – 0,7%; примеси не более: C – 0,05%; O<sub>2</sub> – 0,02%; N<sub>2</sub> – 0,02%) [1, 2].

Широко используется в промышленности также сплав титана ВТ6С (легирующие элементы: Al – 5,3...6,8%; V – 3,5...5,5%; примеси не более: O<sub>2</sub> – 0,20%; N<sub>2</sub> – 0,05%; H<sub>2</sub> – 0,015% согласно ГОСТ 19807), известный как хорошо свариваемый конструкционный материал, плотность которого почти в два раза ниже, чем у железа [3].

Многослойный металлический композиционный материал системы Ti–Nb получен путем прокатки (сварки) листовых заготовок сплавов ниобия и титана на стане при температуре 1110 ± 10 К. В первом проходе обжатие составляло 15...20%, в последующих – 7...10%. После этого заготовки отжигались в вакууме при 1040 ± 10 К в течение 3 ч. В результате получен слоистый композиционный материал толщиной от 2,5 до 3 мм.

Исследовали три партии (25, 27, 30) композиционного материала, состоящего из слоев сплавов титана ВТ6С и ниобия ВН-2АЭ, а также сплав титана ВТ6С. Партии 25 и 30 выполнены состоящими из 13 слоев (семь слоев сплава титана и шесть – сплава ниобия), партия 27 – из девяти (пять слоев сплава титана и четыре – сплава ниобия). Причем партия 25 и 30

отличались только степенью обжаривания, т.е. толщиной слоев. В партии 30 суммарная толщина слоев в среднем на 0,5 мм больше, чем в партии 25, а значит, степень обжаривания меньше. Во всех партиях объемное содержание двух компонентов примерно одинаковое.

Исследования характеристик прочности и пластичности слоистых композиционных материалов при растяжении в условиях высоких температур проводили на установке М8 [4], созданной в Институте проблем прочности НАН Украины.

Испытания слоистого материала и сплава титана ВТ6С осуществляли при температуре 290...1700 К, повышая ее через каждые 50...100 град. Образцы нагревали со скоростью 20...40 град/мин в вакууме при остаточном давлении не более 0,5 МПа. Начальная скорость деформации при растяжении составляла  $2 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ .

Плоские образцы вырезали вдоль прокатки по размерам, рекомендованным в [5], с длиной рабочего участка 15 мм.

Образцы с приваренной с помощью точечной конденсаторной сварки термопарой крепили в захватах и нагревали до температуры испытания радиационным излучением от омегаобразного ленточного нагревателя, изготовленного из листового молибдена толщиной 0,3 мм. После необходимой выдержки, составляющей в среднем 10 мин, их растягивали до разрушения. Захваты, изготовленные из нержавеющей стали и молибдена, применялись при температурах соответственно до 1100 и 1900 К. Температуру измеряли платинородиевыми-платиновыми термопарами диаметром 0,2 мм. Распределение температуры по длине рабочей части плоского образца не превышало допустимой по ГОСТ 9651.

Удлинение при деформировании регистрировалось по перемещению активной тяги силовозбуждающего устройства. Диаграмма деформирования записывалась в цифровом виде посредством тензOMETрического комплекса СИИТ-3. Затем, после предварительной обработки на компьютере, она автоматически строилась на графопостроителе в координатах напряжение–деформация.

Механические характеристики ( $\sigma_{0,2}$  – предел текучести;  $\sigma_b$  – предел прочности;  $\delta$  – относительное удлинение;  $\psi$  – относительное сужение) определяли из диаграмм деформирования по общепринятой методике [5].

Размеры поперечного сечения испытанных образцов измеряли микроскопом МБС-1М. Для расчетов  $\psi$  использовали среднюю площадь поперечного сечения двух половинок испытанного образца.

**Результаты и их обсуждение.** Результаты исследования конструкционной прочности и пластичности представлены на рис. 1 в виде температурных зависимостей механических характеристик изученных материалов. С повышением температуры пределы прочности и текучести (рис. 1, а, б), как правило, монотонно понижаются. Рассмотренные температурные зависимости характеристик прочности имеют сходный характер и состоят из пяти монотонно спадающих участков. Следует отметить, что в интервале температур 290...900 К наибольший предел прочности имеет материал партии 25, а в интервале температур 900...1700 К – материал партий 25 и 30. То же можно сказать о пределе текучести испытанных материалов.

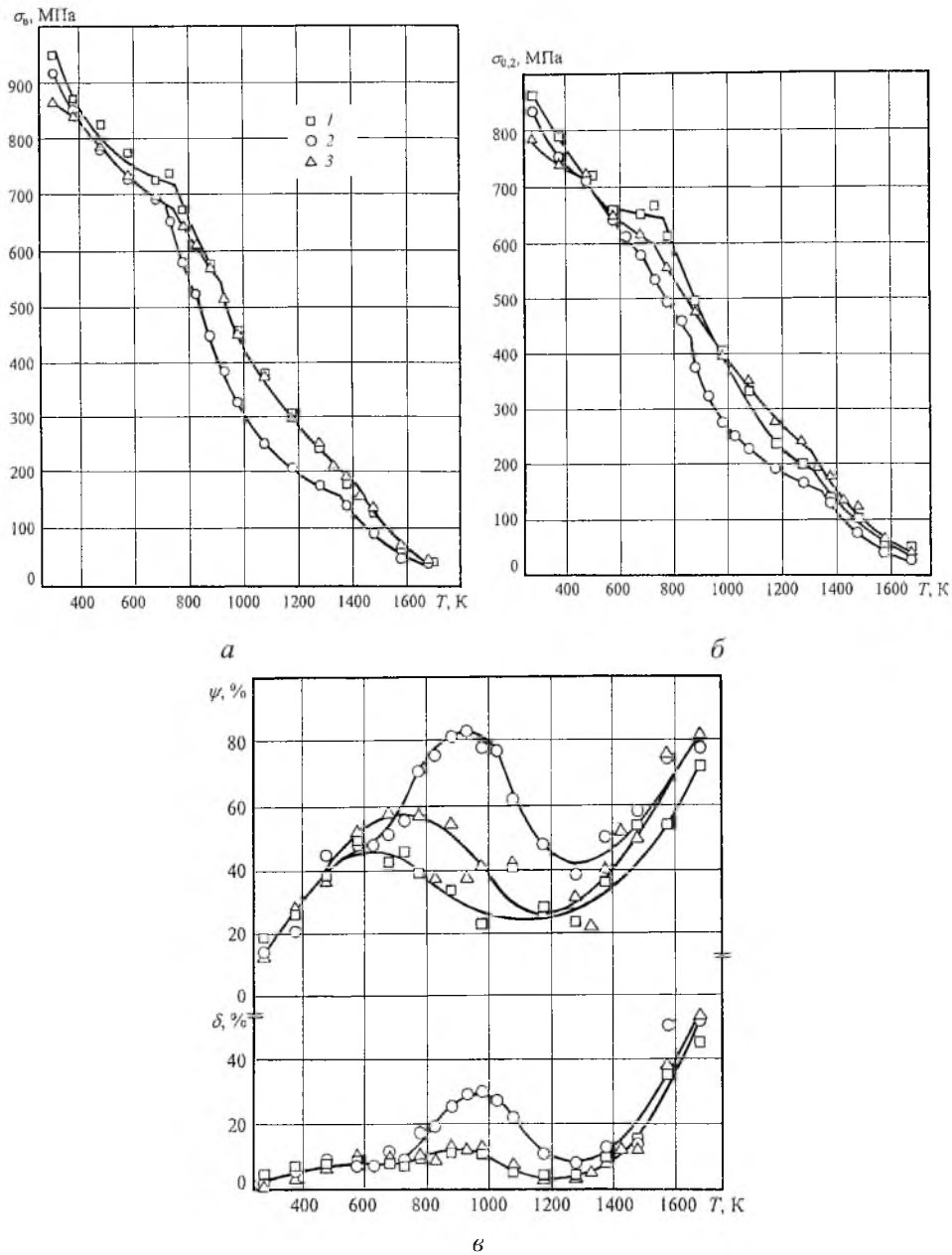


Рис. 1. Зависимости предела прочности  $\sigma_0$  (а), предела текучести  $\sigma_{0,2}$  (б) и относительного сужения  $\psi$  и удлинения  $\delta$  (в) слоистого композиционного материала системы Ti-Nb от температуры: 1, 2, 3 – материал партий 25, 27, 30 соответственно.

Анализ данных испытаний показал, что более прочным оказался материал с большим количеством слоев, а среди материалов с одинаковым количеством слоев – материал партии 25, у которого общая толщина слоев меньше, т.е. материал с большей степенью обжатия. Это наблюдалось в диапазоне температур 290...900 К, при дальнейшем повышении температуры прочность приблизительно стала одинаковой.

Характеристики пластичности, как правило, с повышением температуры увеличиваются (рис. 1,в), за исключением интервалов температур 950...1200 К (для  $\delta$ ) и 670...1170 К (для  $\psi$ ), где происходит их уменьшение.

Таким образом, во всем диапазоне исследуемых температур наиболее пластичным оказался материал партии 27 с меньшим количеством слоев (девять). Материал партий 25 и 30 с одинаковым количеством слоев (13) имеет одинаковую пластичность, т.е. степень обжатия не влияет на пластичность. Однако степень обжатия влияет на величину относительного сужения  $\psi$ . Так, для материала партии 25 с большей степенью обжатия  $\psi$  в интервале температур 500...1700 К выше.

Аналогично изменяются характеристики прочности и пластичности титанового сплава ВТ6С (рис. 2–4).

На рис. 2 показана температурная зависимость предела прочности ниобиевого сплава ВН-2АЭ, данные для построения которой любезно представлены НПО “Композит” (Королев, Россия). Как видно, с повышением температуры предел прочности сплава уменьшается, исключение составляет диапазон температур 400...1200 К, где наблюдается действие динамического деформационного старения (ДДС) [6–9].

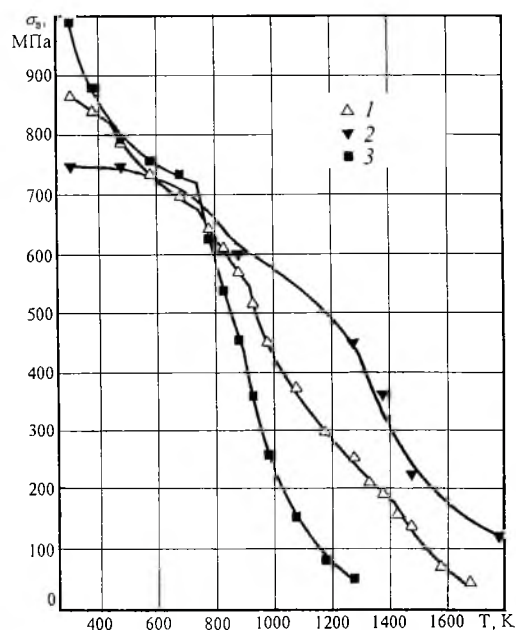


Рис. 2. Зависимости предела прочности 13-слойного композиционного материала системы Ti–Nb (партия 25) – 1, сплавов Nb (ВН-2АЭ) – 2 и Ti (ВТ6С) – 3 от температуры.

Из полученных данных следует (рис. 3), что изменение величин предела прочности слоистого композиционного материала системы Ti–Nb партии 25, рекомендуемой в качестве наиболее перспективной, согласуется со значениями, полученными по уравнению аддитивности (правило смесей), за исключением области действия ДДС [10]. В качестве примера можно привести данные, полученные при температуре 290 и 1270 К с использованием формулы [10]

$$\sigma_k = \sigma_1 V_1 + \sigma_2 (1 - V_1),$$

где  $\sigma_k$  – предел прочности 13-слойного композиционного материала системы Ti-Nb;  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  – пределы прочности соответственно сплавов ВТ6С и ВН-2АЭ;  $V_1$  – объемное содержание сплава ВТ6С в композиционном материале.

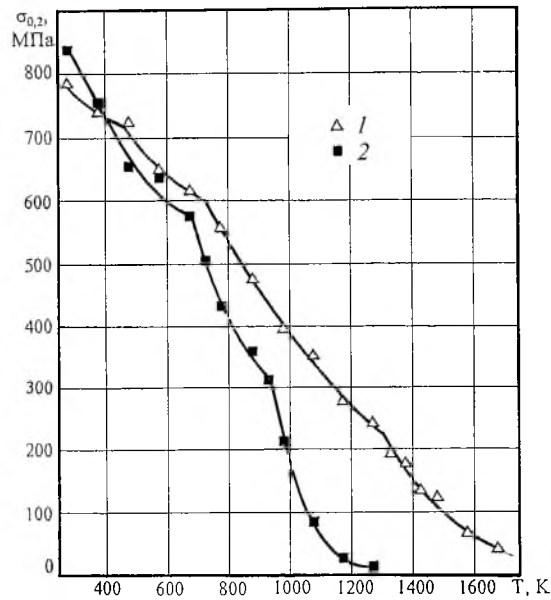


Рис. 3. Зависимости условного предела текучести 13-слойного композиционного материала системы Ti-Nb (партия 25) – 1 и сплава Ti (ВТ6С) – 2 от температуры.

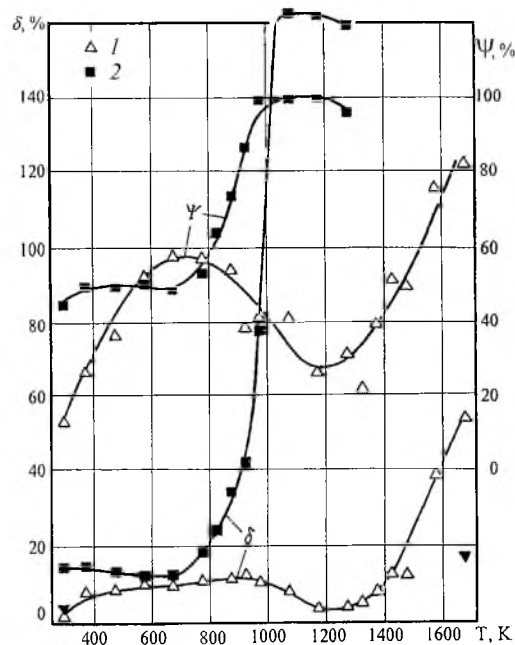


Рис. 4. Зависимости относительного сужения и удлинения 13-слойного композиционного материала системы Ti-Nb (партия 25) – 1 и сплава Ti (ВТ6С) – 2 от температуры.

Определим расчетную прочность композиционного материала при температуре 290 К:

$$\sigma_k = 990 \cdot 0,5 + 745 \cdot (1 - 0,5) = 495 + 372,5 = 867,5 \text{ МПа}$$

и 1270 К:

$$\sigma_k = 50 \cdot 0,5 + 440 \cdot (1 - 0,5) = 25 + 220 = 245 \text{ МПа.}$$

Полученные результаты не превышают 2% предела прочности 13-слойного композиционного материала системы Ti–Nb партии 25.

**Заключение.** В результате выполненных исследований определены механические характеристики 9- и 13-слойных композиционных материалов системы Ti–Nb и сплава ВТ6С в широком интервале температур.

Установлено, что более прочным является материал с большим количеством слоев, а среди материалов с одинаковым количеством слоев – материал с большей степенью обжатия.

Рекомендовано в качестве перспективного материала для дальнейших исследований использовать 13-слойный композиционный материал системы Ti–Nb, который при достаточно большой пластичности имеет более высокие прочностные характеристики по сравнению с другими материалами.

## Резюме

Описано методики випробувань і встановлено температурні залежності (290...1700 К) механічних характеристик при розтязі 9- і 13-шарових композиційних матеріалів системи Ti–Nb з рівним об'ємним вмістом компонентів і титанового сплаву ВТ6С. Установлено, що більш міцним є матеріал, що має більшу кількість шарів, а серед матеріалів з однаковою кількістю шарів необхідно виділити матеріал із більшим ступенем обтиснення. Величини границі міцності добре узгоджуються з рівнянням адитивності, за виключенням області дії динамічного деформаційного старіння.

1. *Тугоплавкие металлы и сплавы* / Под ред. Г. С. Бурханова и Ю. В. Ефимова. – М.: Металлургия, 1986. – 352 с.
2. *Металлургия и технология сварки тугоплавких металлов и сплавов на их основе* / Под ред. С. М. Гуревича. – Киев: Наук. думка, 1982. – 304 с.
3. *Гуревич М. Г.* Справочник по сварке цветных металлов. – Киев: Наук. думка, 1981. – 608 с.
4. *Кращенко В. П., Ластовец Ю. П., Рудницкий Н. П.* Установка для изучения механических свойств материалов в широком диапазоне температур и скоростей деформирования // Пробл. прочности. – 1987. – № 2. – С. 112 – 114.
5. *Методы испытания, контроля и исследования машиностроительных материалов: Справочное пособие.* В 3 т. / Под общ. ред. А. Т. Туманова. Т. 2. Методы исследования механических свойств металлов / Под ред. С. И. Кишкиной и Н. М. Склярова. – М.: Машиностроение, 1974. – 320 с.

6. Борисенко В. А., Краценко В. П., Стаценко В. Е., Харченко В. К. Влияние температуры и скорости деформирования на механические свойства малолегированного сплава ниобия // Пробл. прочности. – 1979. – № 12. – С. 77 – 78.
7. Honeycombe R. W. K. The Plastic Deformation of Metals. – Edward Arnold (Publishers) Ltd, 1968. – P. 408.
8. Краценко В. П., Стаценко В. Е. Влияние температуры и скорости деформирования на прочность тантала. Сообщ. 1. Механические свойства // Пробл. прочности. – 1981. – № 2. – С. 76 – 80.
9. Краценко В. П., Стаценко В. Е. Влияние температуры и скорости деформирования на прочность тантала. Сообщ. 2. Механизмы и процессы протекания пластической деформации // Там же. – № 3. – С. 60 – 65.
10. *Modern Composite Materials* / Eds. L. J. Broutman and R. H. Kroch. – Addison-Wesley Publishing Company, 1967.

Поступила 23. 07. 2001