

Высокотемпературная прочность тугоплавких металлов, сплавов и композиционных материалов на их основе. Сообщение 1. Вольфрам, его сплавы и композиты

В. К. Харченко, В. В. Бухановский

Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина

Обобщены результаты исследований механических характеристик вольфрама, сплавов и композиционных материалов на его основе, используемых в ракетно-космической технике. Исследования проводили в условиях кратковременного, длительного статического и малоциклового нагружения на малых временных базах в диапазоне температур 290...3020 К.

Ключевые слова: вольфрам и его сплавы, композиционные материалы, кратковременная прочность, длительная прочность, секундная ползучесть, пластичность, корреляционная связь.

Введение. Тугоплавкие металлы, а также сплавы и композиционные материалы (КМ) на их основе, обладающие уникальным комплексом физико-механических характеристик, широко используются в авиационной и ракетно-космической технике (РКТ) при изготовлении деталей и узлов, которые подвергаются воздействию высоких нагрузок, температур, агрессивных газовых сред и других неблагоприятных эксплуатационных факторов [1–3]. Среди основных требований, предъявляемых к изделиям столь ответственного назначения, – высокая надежность и экономичность. Обеспечить это можно с помощью комплекса мероприятий, среди которых особое место отводится повышению точности расчета конструкции на прочность, что гарантирует заданный ресурс ее несущей способности. А это возможно на основе знаний свойств материала в условиях, максимально приближенных к эксплуатационным, с учетом его структурных параметров и влияния технологических факторов. Среди тугоплавких металлов наиболее высокими показателями жаропрочности, коррозионной и эрозионной стойкости в агрессивных средах обладает вольфрам, имеющий также самую высокую температуру плавления (3695 К).

Настоящее сообщение посвящено обобщению результатов исследований механических характеристик вольфрама, сплавов и композиционных материалов на его основе, используемых в ракетно-космической технике, в условиях кратковременного и длительного статического нагружения на малых временных базах в широком диапазоне высоких температур, выполненных в течение ряда лет в Институте проблем прочности (далее – ИПП) им. Г. С. Писаренко НАН Украины.

Механические характеристики вольфрама и его сплавов при кратковременном статическом нагружении. Работы по созданию лабораторных установок и разработке методик исследования механических характеристик тугоплавких металлических материалов при различных видах нагружения в условиях высоких температур были начаты в ИПП под руководством академика НАН Украины Г. С. Писаренко в 60 годах 20 ст. На первом этапе иссле-

дований с использованием созданной методической базы были определены температурные зависимости прочности, пластичности, твердости и модулей упругости для технически чистых тугоплавких металлов (99,95%), таких как вольфрам, тантал, молибден, ниобий, и малолегированных сплавов на их основе, полученных методами литья, порошковой металлургии (ПМ) и вакуумно-дуговой плавки (ВДП) в исходном состоянии и после термической обработки. Результаты исследований описаны в работах [4–7].

В 70–80 годах приобрела актуальность проблема повышения несущей способности различных деталей и элементов конструкций горячего тракта РКТ. При стендовых испытаниях в них образовывались трещины, что приводило к разрушениям. Это потребовало подробного изучения физико-механических свойств вольфрама и его сплавов из-за особенностей макро- и микро-структуры материалов изделий различных партий, формирующейся после горячей прокатки, литья, отжига, нанесения защитных покрытий с учетом режимов термосилового нагружения при эксплуатации. Так, было установлено, что прочностные характеристики полученного методами ПМ вольфрама, применяемого в качестве материала газоструйных рулей объектов РКТ (до 3700 К), существенно зависят от типа структуры, сформировавшейся при термической обработке. Показано, что величина зерен, степень их неоднородности и несовершенство кристаллического строения материала в такой структуре разные. Наличие в структуре спеченных заготовок неметаллических включений, содержащих титан и поры размером более 1 мкм, способствует концентрации напряжений в локальных зонах и зарождению центров рекристаллизации. В некоторых случаях рекристаллизация с образованием ультрамелкозернистой структуры наблюдается в сверхчистых по ряду контролируемых примесей заготовках.

При высокотемпературном нагружении вольфрама в условиях температур выше 1800 К имеет место критическая стадия полигонизации [8], по которой определяется стойкость изделий к термоудару и образованию микротрещин. Предложены оптимальный химический состав вольфрама и способы контроля заготовок с целью обнаружения рекристаллизованных структур. Исследовали также механические характеристики дисперсно-упрочненных промышленных сплавов вольфрама ПМ с оксидным ($W-Y_2O_3-HfO_2$ и $W-Y_2O_3-HfO_2-Cu$), карбидным ($W-HfC-W_2C$) и комплексным карбидно-оксидным ($W-HfC-HfO_2$) упрочнением, обладающих более высокими прочностными свойствами по сравнению с таковыми нелегированного вольфрама ПМ (рис. 1, 2). Показаны преимущества карбидного и карбидно-оксидного упрочнения вольфрама по сравнению с оксидным при температурах 1800...3000 К, особенно при длительном статическом нагружении на малых временных базах. При изучении характеристик секундной ползучести и длительной прочности на малых временных базах вольфрама ПМ и его сплавов с оксидным упрочнением в интервале температур 1770...3000 К установлено, что легирование вольфрама до 0,5...1,0 об.% частицами оксидов гафния и иттрия уменьшает в 1,5...3 раза его долговечность и увеличивает в 1,5...6 раз скорость установившейся ползучести в результате рассыпания дислокационных ячеек в областях вокруг оксидных частиц при протекании критической стадии полигонизации и динамической рекристаллизации [9–12].

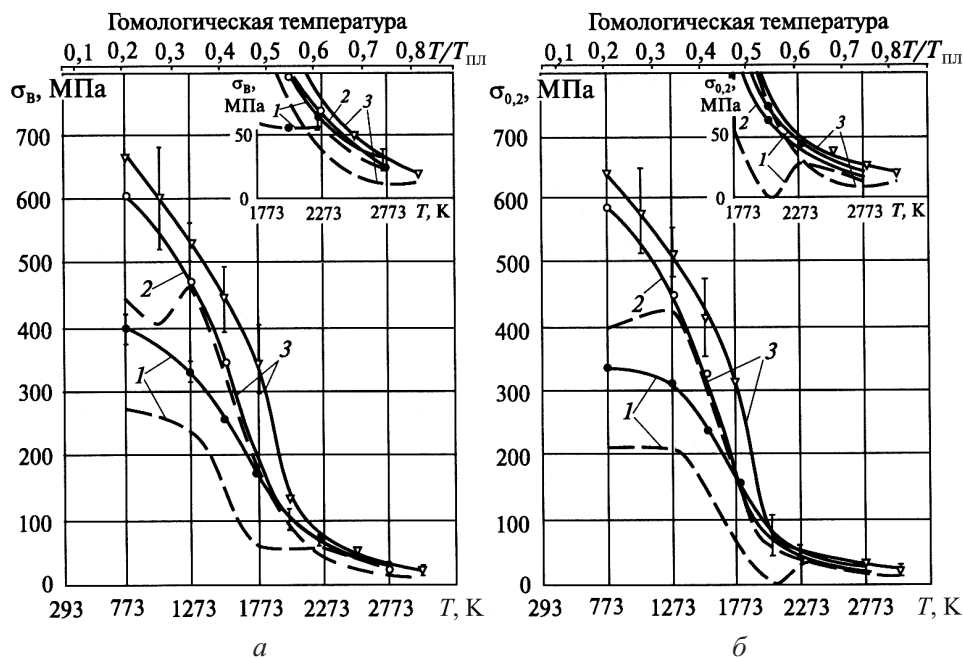


Рис. 1. Температурная зависимость предела прочности (а) и условного предела текучести (б) технического вольфрама ПМ, деформированного до 50 (1) и 65...75% (2), а также сплавов $W-Y_2O_3-HfO_2$ и $W-Y_2O_3-HfO_2-Cu$, обжатых до 65...75% (3). (Здесь и на рис. 2 штриховыми линиями обозначены температурные зависимости нижних гарантированных пределов механических характеристик.)

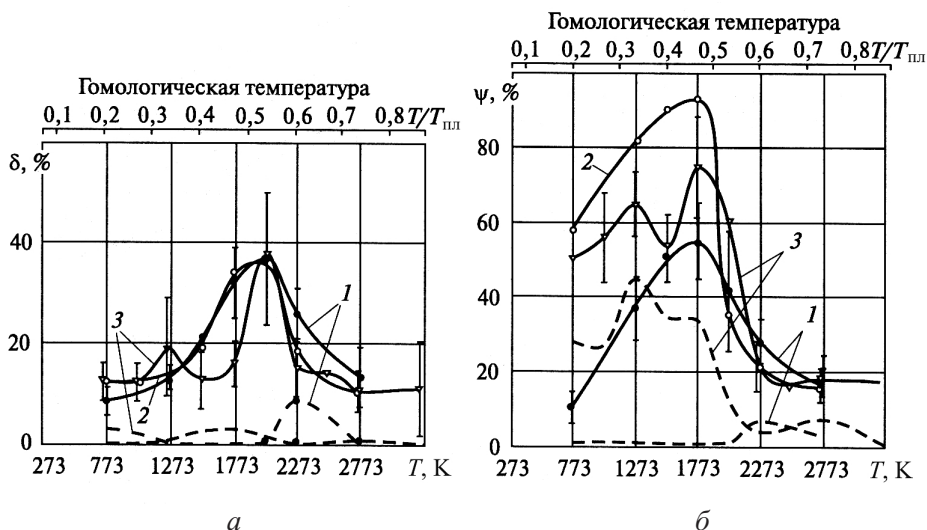


Рис. 2. Температурная зависимость относительного удлинения (а) и сужения (б) технического вольфрама ПМ, деформированного до 50 (1) и 65...75% (2), а также сплавов $W-Y_2O_3-HfO_2$ и $W-Y_2O_3-HfO_2-Cu$, обжатых до 65...75% (3).

Анализ механических характеристик вольфрама ПМ, полученных при кратковременном активном и длительном статическом растяжении на малых временных базах в диапазоне температур 1770...2770 К ($(0,5...0,8)T_{пл}$), сви-

детельствует, что между характеристиками кратковременной, длительной статической прочности и ползучести существуют корреляционные связи, которые описываются единой функциональной зависимостью [13].

Механические характеристики вольфрам-медных псевдосплавов АВМГ-1, ВНДС-1 и ВДМП. Вольфрам-медные псевдосплавы (ВМПС) благодаря уникальным физико-механическим свойствам применяются в качестве конструкционных материалов для деталей РКТ, эксплуатируемых при воздействии мощных тепловых потоков. Их работоспособность в таких экстремальных условиях обеспечивается за счет самоохлаждения и релаксации термических напряжений, что присуще КМ, состоящим из тугоплавкого вольфрамового каркаса и заполненных медью пор. Плавление и испарение меди из деталей сопровождается значительным эндотермическим эффектом, предупреждающим перегрев тугоплавкого каркаса элемента конструкции. Композиты ВНДС-1 и ВДМП получают методом пропитки спеченного пористого вольфрамового каркаса медью, АВМГ-1 – горячим прессованием смеси порошков вольфрама и меди [14–17].

В работах [18, 19] впервые были определены характеристики модулей упругости (E , G) вольфрам-медных псевдосплавов в диапазоне температур 290...2770 К (рис. 3). В результате анализа экспериментальных данных были установлены ранее неизвестные закономерности изменения этих характеристик. Исследования прочности и пластичности ВМПС проводили в широком диапазоне температур (до 3300 К) в зависимости от состава КМ (плотность, содержание тугоплавкой компоненты и меди), технологии производства, давления внешней среды, особенностей деформирования и разрушения в связи с развитием микротрещин (рис. 4).

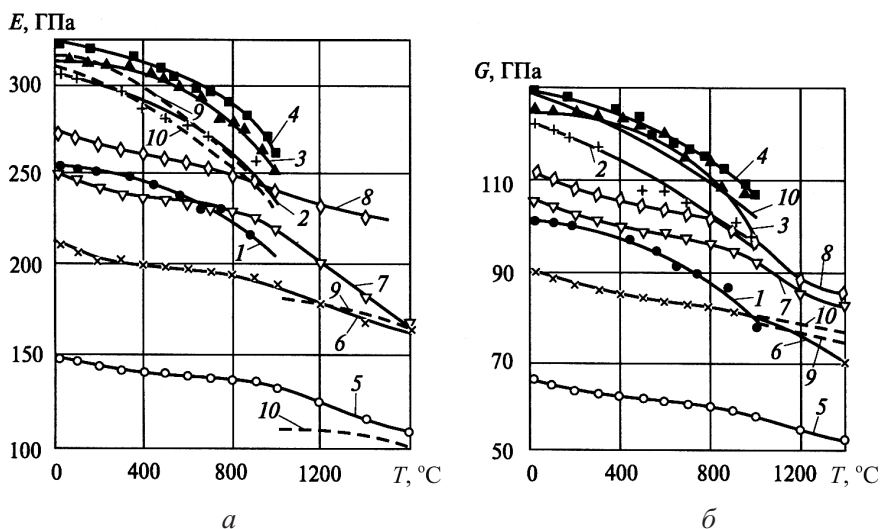


Рис. 3. Экспериментальные (1–8) и расчетные (9, 10) [17] зависимости модулей Юнга (а) и сдвига (б) от температуры при различных относительных плотностях вольфрамового каркаса ν и средних плотностях исходного материала ρ (1 – $\nu = 0,7...0,75$, $\rho = 15,68 \text{ г/см}^3$; 2 – $\nu = 0,75...0,8$, $\rho = 16,78 \text{ г/см}^3$; 3 – $\nu = 0,8...0,85$, $\rho = 16,83 \text{ г/см}^3$; 4 – $\nu = 0,85...0,9$, $\rho = 17,32 \text{ г/см}^3$) и ВМПС после выпаривания меди (5 – $\nu = 0,7...0,75$, $\rho = 15,47 \text{ г/см}^3$; 6 – $\nu = 0,75...0,8$, $\rho = 16,31 \text{ г/см}^3$; 7 – $\nu = 0,8...0,85$, $\rho = 16,31 \text{ г/см}^3$; 8 – $\nu = 0,85...0,9$, $\rho = 17,02 \text{ г/см}^3$).

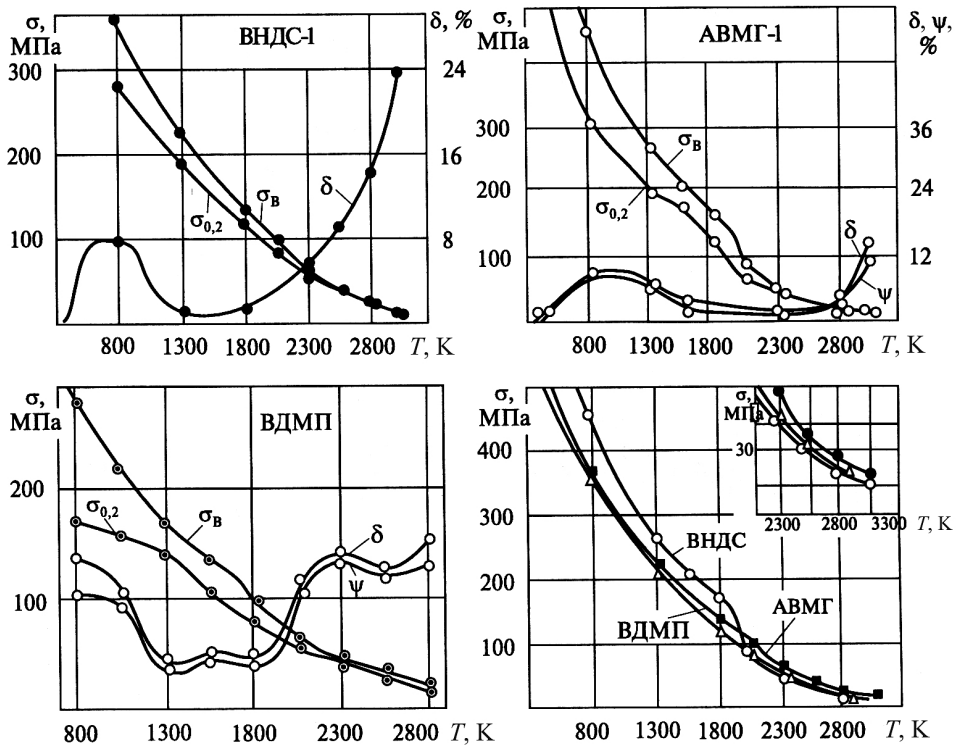


Рис. 4. Зависимости характеристик прочности и пластичности вольфрам-медных псевдосплавов от температуры.

Анализ температурных зависимостей характеристик прочности и пластичности композиций вольфрам–медь различных технологий производства с учетом их связи с микромеханизмами разрушения материала позволяет определить их наиболее оптимальные составы, полученные методами пропитки и горячего прессования, в том числе с учетом степени дисперсности исходных порошков. Процесс деформирования псевдосплавов при высоких температурах происходит путем хрупкого разрыхления материала с образованием зернограничных микротрещин. Различие в прочности композитов ВНДС-1, ВДМП и АВМГ-1 обусловлено разными температурными режимами спекания тугоплавкого каркаса и пропитки его медью, а также другими технологическими особенностями. Благодаря полученным результатам были начаты поиски путей повышения прочности и пластичности псевдосплавов при увеличении прочности границ раздела W–W до уровня прочности кристаллита, в частности за счет микролегирования зерен вольфрама редкоземельными металлами.

Показано, что соотношение между пределом прочности псевдосплавов и их плотностью описывается линейной зависимостью. Повышение пластических свойств псевдосплавов с ростом плотности в диапазоне температур до $0,6T_{пл}$ вольфрама и их снижение при температуре $0,75T_{пл}$ и выше обусловлено сменой механизма деформирования с хрупкого разрыхления на высокотемпературное зернограничное скольжение [16].

Для “удержания” меди в образцах при высокотемпературных механических испытаниях псевдосплавов была разработана новая методика и созда-

на установка ВДГ-10 для механических испытаний композиционных материалов, содержащих легкоплавкие составляющие при повышенном давлении среды до 10 МПа в широком диапазоне температур (до 2800 К) [7]. Показано, что выпаривание меди из псевдосплавов до механических испытаний в 1,1...2,3 раза (в зависимости от марки сплава) снижает прочность вольфрамового каркаса во всем диапазоне температур и повышает его пластичность в высокотемпературной области.

Предложены регрессионные модели, описывающие прочность псевдосплавов ВДС-1, АВМГ-1 и ВДМП с учетом состава и температуры, и проведена оптимизация состава данных материалов по критической плотности.

Выводы

1. Получены физико-механические характеристики и установлены закономерности деформирования и разрушения вольфрама, сплавов и КМ на его основе при кратковременном и длительном статическом нагружении на малых временных базах в широком диапазоне температур с учетом влияния химического состава материала, структуры, технологических и эксплуатационных факторов.

2. Результаты исследований использовали при выборе состава, оптимизации технологии производства материалов на основе вольфрама, а также в прочностных расчетах ответственных деталей и конструктивных элементов объектов ракетно-космической техники.

Резюме

Узагальнено результати досліджень механічних властивостей вольфраму, сплавів та композиційних матеріалів на його основі, що використовуються в ракетно-космічній техніці. Дослідження проводили в умовах короткочасного, тривалого статичного та малоциклового навантаження на малих часових базах у діапазоні температур 290...3020 К.

1. *Тугоплавкие металлы и сплавы* / Под ред. Г. С. Бурханова, Ю. В. Ефимова. – М.: Металлургия, 1986. – 352 с.
2. *Моргунова Н. Н., Клытин Б. А., Бояришинов В. А. и др.* Сплавы молибдена. – М.: Металлургия, 1975. – 392 с.
3. *Тугоплавкие материалы в машиностроении. Справочник* / Под ред. А. Т. Туманова, К. И. Портного. – М.: Машиностроение, 1967. – 392 с.
4. *Писаренко Г. С., Борисенко В. А., Городецкий С. С. и др.* Прочность тугоплавких металлов. – М.: Металлургия, 1970. – 367 с.
5. *Прочность материалов и элементов конструкций в экстремальных условиях.* В 2 т. / Под ред. Г. С. Писаренко. – Киев: Наук. думка, 1980. – Т. 1. – 535 с.
6. *Борисенко В. А.* Твердость и прочность тугоплавких материалов при высоких температурах. – Киев: Наук. думка, 1984. – 212 с.

7. Харченко В. К. О высокотемпературной прочности тугоплавких металлов // Пробл. прочности. – 1980. – № 10. – С. 94 – 103.
8. Кравченко В. С., Харченко В. К. Влияние критической стадии полигонизации на характеристики пластичности вольфрама при высокотемпературных механических испытаниях // Там же. – 1981. – № 5. – С. 82 – 88.
9. Бухановский В. В., Харченко В. К., Кравченко В. С. и др. Характеристики прочности и пластичности вольфрама и сплавов на его основе. I. Механические свойства // Порошк. металлургия. – 1985. – № 8. – С. 80 – 86.
10. Бухановский В. В., Харченко В. К., Кравченко В. С. и др. Характеристики прочности и пластичности вольфрама и сплавов на его основе. II. Секундная ползучесть и длительная прочность на базе $1 \cdot 10^4$ с // Там же. – № 9. – С. 76 – 84.
11. Поварова К. Б., Харченко В. К., Хмелькова М. А. и др. Высокотемпературная прочность сплавов систем W–Me_nO_m и W–MeC–Me_nO_m, приготовленных методами порошковой металлургии // Физика и химия обработки материалов. – 1985. – № 6. – С. 81 – 86.
12. Бухановский В. В., Харченко В. К., Поварова К. Б. и др. Кратковременная ползучесть и длительная прочность на базе $1 \cdot 10^4$ с технически чистого вольфрама и сплава системы W–HfC–HfO₂ при высоких температурах // Пробл. прочности. – 1987. – № 9. – С. 32 – 39.
13. Борисенко В. А., Бухановский В. В., Мамузич И. Взаимосвязь между характеристиками кратковременной, длительной статической прочности и сопротивлением ползучести вольфрама при высоких температурах (на англ. яз.) // Там же. – 2005. – № 6. – С. 50 – 60.
14. Карпинос Д. М., Кравченко А. А., Пилиповский Ю. Л. и др. Исследование механических характеристик горячепрессованных псевдосплавов вольфрам-медь // Там же. – 1970. – № 12. – С. 64 – 68.
15. Харченко В. К., Скрипник Н. В., Пилиповский Ю. Л. Закономерности деформирования и разрушения горячепрессованного вольфрам-медного псевдосплава при высоких температурах // Там же. – 1986. – № 12. – С. 56 – 62.
16. Скрипник Н. В. Прочность вольфрам-медных псевдосплавов при высоких температурах: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Киев, 1987. – 16 с.
17. Тучинский Л. И. Композиционные материалы, получаемые методом пропитки. – М.: Металлургия, 1986. – 207 с.
18. Яковкин В. Н. Упругие свойства прессованных вольфрам-медных композитов // Пробл. прочности. – 1986. – № 2. – 104 – 110.
19. Яковкин В. Н. Характеристики упругих и неупругих свойств псевдосплавов на основе тугоплавких металлов в широком диапазоне температур: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Киев, 1986. – 15 с.

Поступила 22. 06. 2011