

Температурные зависимости статических механических свойств микрослойного композиционного материала МДК-3

В. А. Борисенко^а, В. В. Бухановский^а, Н. И. Гречанюк^б, И. Н. Гречанюк^б,
И. Мамузич^в, В. А. Осокин^б, Н. П. Рудницкий^а

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

^б Научно-производственное предприятие “Теконт”, Винница, Украина

^в Загребский университет, Шишак, Хорватия

Изучены структура, твердость, кратковременная прочность и пластичность микрослойного композиционного наноматериала системы медь–цирконий–иттрий–молибден, полученного методом электронно-лучевого испарения и послойной конденсации из паровой фазы, в диапазоне температур 290...1070 К. Установлены корреляционные зависимости между твердостью и характеристиками прочности композита.

Ключевые слова: прочность, пластичность, твердость, температура, корреляция, наноматериалы, термодинамический активационный анализ.

Введение. В настоящее время в качестве электроконтактных материалов для тяжело нагруженных коммутационных аппаратов все более широко применяются микрослойные композиты на основе меди, молибдена и редкоземельных металлов. Материалы данного класса, получаемые методом высокоскоростного испарения в вакууме с последующей конденсацией смешанного парового потока на вращающейся подложке, обладают уникальными физико-механическими и эксплуатационными свойствами. В Украине в НПП “Теконт” в течение ряда лет серийно изготавливаются дисперсно-упрочненные композиционные материалы системы Cu–Zr–Y–Mo серии МДК (ТУ У 20113410.001-98) с содержанием молибдена от 2,5...5,0 до 8,1...12,0 мас.% и суммарным содержанием циркония и иттрия не более 0,8 мас.% [1–4].

В связи с тем что материалы контактных пар сильноточных коммутационных аппаратов в процессе эксплуатации подвергаются не только высокотемпературной коррозии и электрической эрозии, но и механическим нагрузкам при повышенных температурах, исследование их механических характеристик в диапазоне рабочих температур представляет несомненный научный и практический интерес.

В работе приведены данные экспериментальных исследований структуры, прочности, твердости и пластичности наиболее перспективного микрослойного композиционного материала марки МДК-3 с содержанием молибдена $11,3 \pm 0,2$ мас.% в интервале температур 290...1070 К.

Методы исследований. Структуру композиционного материала исследовали методами оптической и сканирующей электронной микроскопии. Механические характеристики определяли по результатам испытаний на растяжение в вакууме плоских пятикратных пропорциональных образцов с расчетной длиной рабочего участка 15 мм на установке 1246-Р [5] согласно

ГОСТ 9651-84 [6]. Образцы вырезали из конденсата толщиной 0,9–1,4 мм в состоянии поставки (после вакуумного отжига при 1170 К в течение 3 ч.). При каждой температуре испытывали от трех до шести образцов. Скорость деформирования образца составляла 2 мм/мин, что соответствовало относительной скорости деформации $\sim 2,2 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$. В процессе испытаний записывали диаграммы, по которым определяли условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, предел прочности $\sigma_{\text{в}}$, относительное удлинение δ и относительное равномерное удлинение $\delta_{\text{р}}$. Кроме того, определяли относительное сужение ψ .

Твердость определяли методом вдавливания индентора в виде правильной четырехгранной пирамиды. В качестве наконечника использовали монокристалл синтетического корунда. Нагрузка на образец, передаваемая через пирамиду, составляла 10 Н. Испытания осуществляли в вакууме при давлении не более 0,7 МПа на установке УВТ-2 [7] согласно ДСТУ 2434-94 [8].

Экспериментальные данные обрабатывали с помощью стандартных методов математической статистики. При этом вычисляли среднее выборочное значение (математическое ожидание) x , выборочное среднеквадратическое отклонение S , коэффициент вариации w и доверительные интервалы Δx для математического ожидания при уровне значимости $\alpha = 0,05$.

Результаты экспериментов и их обсуждение. Специфика технологии получения композитов обуславливает формирование особой микрослойной структуры, присущей для наноматериалов [9], с толщиной чередующихся слоев меди и молибдена от 0,1 до 0,4 мкм (рис. 1). Размер зерен меди в композите составляет 0,1–0,3 мкм, размер зерен молибдена – 0,1–0,2 мкм.

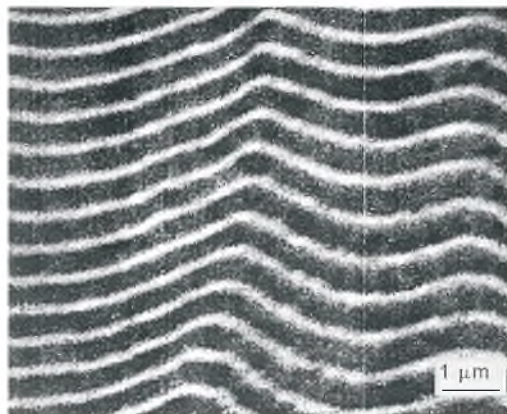


Рис. 1. Микроструктура композиционного материала Cu–Zr–Y–Mo (сканирующая электронная микроскопия).

Характеристики кратковременной прочности и пластичности композиционного материала МДК-3 в состоянии поставки в интервале температур от 290...1070 К приведены в табл. 1. Из данных табл. 1 следует, что разупрочнение композита при нагреве носит монотонный характер. Предел прочности и условный предел текучести материала монотонно снижаются соответственно с 645 и 596 МПа при комнатной температуре до 45 и 39 МПа при 1070 К.

Т а б л и ц а 1

Характеристики прочности и пластичности микрослойного композиционного материала МДК-3 в диапазоне температур 290...1070 К

T, K	σ_B, MPa	$\sigma_{0,2}, MPa$	$\delta, \%$	$\delta_p, \%$	$\psi, \%$
290	645	596	8,7	3,3	37,6
370	568	533	8,8	2,7	18,3
470	475	438	12,4	2,2	33,1
570	348	330	1,8	1,1	7,0
670	287	266	7,9	2,1	13,5
770	205	185	8,8	2,3	12,8
870	140	130	13,1	1,6	9,1
970	82	73	17,1	2,5	16,6
1070	45	39	21,7	3,4	33,7

Характер температурных зависимостей пластических свойств микрослойного композита более сложный. Видны экстремумы, связанные с горячей хрупкостью материала, присущей меди и ее сплавам. В частности, резкое снижение характеристик пластичности наблюдается при температуре 570 К.

Результаты исследования температурных зависимостей твердости композиционного материала МДК-3 представлены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Твердость микрослойного композиционного материала МДК-3 в диапазоне температур 290...1020 К

T, K	HV_{cp}, MPa	S	$w, \%$	$\Delta HV, MPa$
290	1802	310,8	17,3	$\pm 90,2$
370	1349	208,5	15,5	$\pm 103,7$
470	1066	94,1	8,8	$\pm 46,8$
570	776	44,5	5,7	$\pm 22,1$
670	577	64,1	11,1	$\pm 30,9$
770	414	70,5	17,0	$\pm 35,1$
870	303	86,1	28,4	$\pm 44,3$
970	213	73,7	34,6	$\pm 36,7$
1020	151	55,1	36,5	$\pm 25,1$

С повышением температуры твердость уменьшается от максимальных значений $1802 \pm 90,2$ МПа при комнатной температуре до минимальных значений $151 \pm 25,1$ МПа при 1020 К.

Термодинамический активационный анализ зависимостей прочности и твердости микрослойного композиционного материала МДК-3 от температуры проводили по изложенной ранее методике [10, 11]. При этом для установления основных закономерностей изменения прочностных свойств в исследованном диапазоне температур исходили из экспоненциальных урав-

нений, описывающих температурные зависимости прочности и твердости соответственно:

$$\sigma = A \exp\left(\frac{U}{3kT}\right); \quad (1)$$

$$H = cA \exp\left(\frac{U}{3kT}\right), \quad (2)$$

где T – термодинамическая температура, К; U – энергия (энтальпия) активации пластической деформации, эВ; k – постоянная Больцмана; A – постоянная, являющаяся функцией параметров материала и скорости деформации; $c = H/\sigma$ – константа пропорциональности.

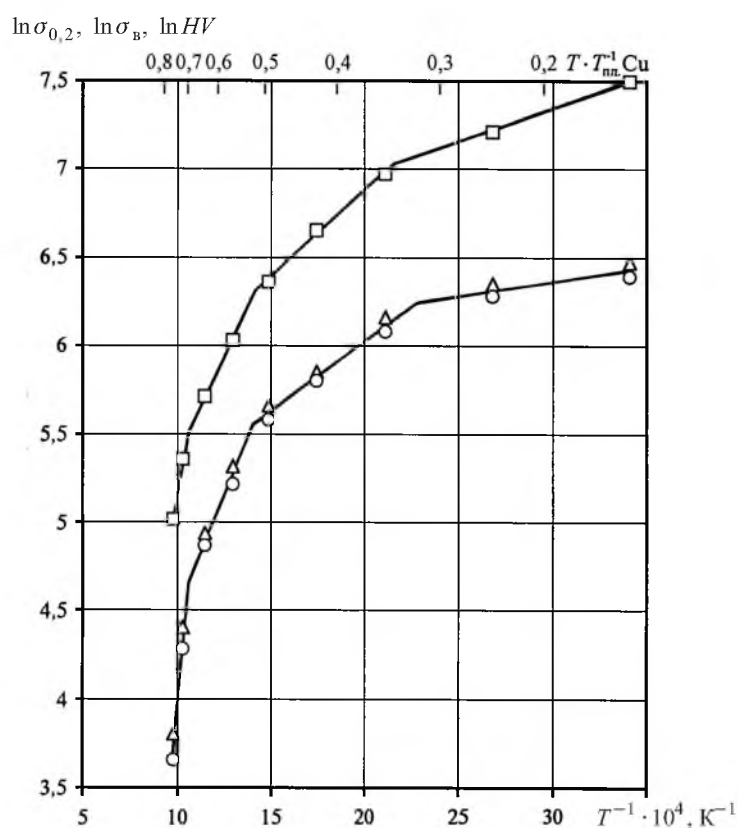


Рис. 2. Температурные зависимости предела прочности σ_b , условного предела текучести $\sigma_{0,2}$ и твердости HV микрослойного композиционного материала МДК-3 в диапазоне температур 290...1070 К: \triangle – σ_b ; \circ – $\sigma_{0,2}$; \square – HV .

На рис. 2 полученные данные представлены в координатах $\ln \sigma_{0,2}$, $\ln \sigma_b$, $\ln HV - 1/T$. Видно, что температурные зависимости характеристик прочности и твердости состоят из нескольких областей, в пределах которых они носят линейный характер и удовлетворяют уравнениям (1) и (2). Каждая из указанных областей соответствует определенному вероятному механизму пластической деформации. На основании уравнений (1) и (2) по экспери-

ментальным данным прочности и твердости для разных температурных областей в диапазоне $(0,2...0,8) T_{пл}^{Cu}$ были определены значения энергии активации пластической деформации (табл. 3), соответствующие условиям деформации металлов с умеренными скоростями 10^{-3} с^{-1} под действием приложенных напряжений, превышающих 10^{-4} модуля сдвига.

Т а б л и ц а 3

Энергия активации пластической деформации композиционного материала МДК-3 и технически чистой меди, рассчитанная по различным характеристикам прочности

Материал	Характеристика прочности	U (эВ) в интервале температур (К)			
		290...420	420...700	700...900	900...1070
МДК-3	HV	0,11	0,19	0,67	0,93
	σ_B	0,04	0,19	0,66	2,97
	$\sigma_{0,2}$	0,04	0,18	0,66	3,26
Cu	HV	0,05	0,22	0,93	1,85

Анализ и сопоставление полученных значений энергии активации пластической деформации меди и композиционных материалов на ее основе (табл. 3), а также обобщенных ранее [10, 11] результатов теоретических и экспериментальных работ по изучению процессов деформации, внутреннего трения, ползучести и самодиффузии меди позволяет заключить: в широком диапазоне температур наблюдается пластическое течение с существенным изменением энергии активации при переходе от одной температурной области к другой. Это свидетельствует о последовательной смене действующих (контролирующих), термически активированных механизмов пластической деформации. Возможные основные механизмы для металлов систематизированы в работах [10–13]. Характер зависимостей прочности и твердости от температуры аналогичен, они подчиняются общим закономерностям изменения свойств с повышением температуры.

Анализ экспериментальных и расчетных данных показал, что указанные характеристики прочности исследуемого материала контролируются одними и теми же механизмами пластической деформации, и температурные области их действия совпадают. Поэтому поиск корреляционных соотношений между характеристиками прочности следует проводить на тех участках температурного диапазона, где прочность контролируется одинаковыми механизмами или по крайней мере не происходит смены последних (для композиционного материала МДК-3 – это участки 290...420 К, 420...700 К, 700...900 К и 900...1070 К).

Целью корреляционного анализа является установление функциональной связи между твердостью и пределом прочности σ_B , а также условным пределом текучести $\sigma_{0,2}$. Эмпирические распределения σ_B и $\sigma_{0,2}$ (рис. 3) представляют собой совокупность точек на плоскости, координаты которых соответствуют значениям указанных характеристик при различных фикси-

рованных температурах. Как видно, поля корреляции имеют несколько участков, каждый из которых достаточно хорошо описывается линейной функцией регрессии. Причем такой вид функции полностью удовлетворяет теоретическим выкладкам о линейной зависимости между твердостью и характеристиками прочности. Температурные интервалы для этих участков, как и следовало ожидать, совпадают с интервалами отдельных механизмов и процессов пластической деформации.

Т а б л и ц а 4

Эмпирические коэффициенты регрессии a, b характеристик прочности на твердость композиционного материала МДК-3

Вид связи	T, K	a	b	Коэффициент корреляции
$\sigma_B \rightarrow HV$	290...420	0,170	339	1,0
	420...700	0,388	57	0,996
	700...900	0,586	-37	1,0
	900...1070	0,597	-45	1,0
$\sigma_{0,2} \rightarrow HV$	290...420	0,139	345	1,0
	420...700	0,353	60	0,996
	700...900	0,495	-20	1,0
	900...1070	0,548	-44	1,0

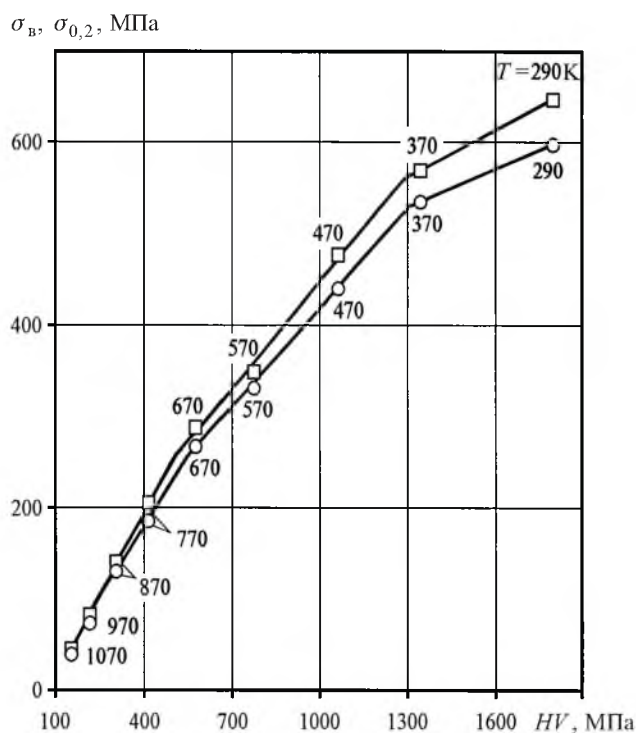


Рис. 3. Поле корреляции и линии регрессии характеристик прочности на твердость микрослойного композиционного материала МДК-3 в условиях температур: \square – $\sigma_B \rightarrow HV$; \circ – $\sigma_{0,2} \rightarrow HV$.

Результаты расчета коэффициентов корреляции и коэффициентов регрессии линейной функции вида $y = ax + b$, описывающей отдельные участки эмпирического распределения, приведены в табл. 4.

Выводы

1. Экспериментально установлены закономерности изменения характеристик статической прочности и твердости микрослойного композиционного материала МДК-3 системы Cu–Zr–Y–Mo в широком диапазоне температур, а также корреляционные связи между ними.

2. Изменение характеристик прочности (предел прочности, условный предел текучести и твердость) при нагреве контролируется одними и теми же механизмами, температурные области действия которых совпадают.

3. Определены коэффициенты уравнений регрессии, связывающие твердость с другими характеристиками прочности электроконтактного материала МДК-3, для каждого интервала температур.

Резюме

Вивчено структуру, твердість, короткочасну міцність і пластичність мікрошарового композиційного наноматеріалу системи мідь–цирконій–ітрій–молибден, що отриманий за методом електронно-променевого випарування і пошарової конденсації з парової фази, в діапазоні температур 290...1070 К. Установлено кореляційні залежності між твердістю і характеристиками міцності композита.

1. Мовчан Б. А., Малащенко И. С. Жаростойкие покрытия, осаждаемые в вакууме. – Киев: Наук. думка, 1983. – 230 с.
2. Grechanyuk N., Matuzich I., and Shpak P. Modern electron-beam technologies of melting and evaporation of materials in vacuum, used by “Gekont”-company, Ukraine // *Metalurgija*. – 2002. – 41, No. 2. – P. 125 – 128.
3. Grechanyuk N., Osokin V., Grechanyuk I., et al. Structure and physical-mechanical properties of composite, condensing from a steam phase materials Cu–Zr–Y–Mo in a wide range of temperatures // *Ibid.* – No. 3. – P. 228 – 229.
4. Гречанюк Н. И., Осокин В. А., Афанасьев И. Б. и др. Электронно-лучевая технология получения материалов для электрических контактов // *Электрические контакты и электроды*. – Киев: Ин-т пробл. материаловедения им. И. Н. Францевича, 1998. – С. 51 – 66.
5. Испытательная техника: Справочник в 2 т. / Под общ. ред. В. В. Клюева. – М.: Машиностроение, 1982. – Т. 2. – 570 с.
6. ГОСТ 9651-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение при повышенных температурах. – Введ. 01. 01. 86.
7. Алексюк М. М., Борисенко В. А., Краценко В. П. Механические испытания при высоких температурах. – Киев: Наук. думка, 1980. – 208 с.

8. ДСТУ 2434-94. Метод визначення високотемпературної твердості вдавлюванням пірамідального та біциліндричного індентора / В. О. Борисенко, О. Б. Оксаметна. – Чинний з 01. 01. 95.
9. Андриевский Р. А., Глезер А. М. Размерные эффекты в нанокристаллических материалах. II. Механические и физические свойства // Физика металлов и металловедение. – 2000. – **89**, № 1. – С. 91 – 112.
10. Борисенко В. А. Твердость и прочность тугоплавких материалов при высоких температурах. – Киев: Наук. думка, 1984. – 212 с.
11. Borisenko V. A. and Krashchenko V. P. Temperature dependences of hardness of group IV Metals // Acta Met. – 1977. – 25, No. 3. – P. 251 – 256.
12. Краценко В. П., Стаценко В. Е. Влияние температуры и скорости деформирования на основные процессы, контролирующие прочность меди // Пробл. прочности. – 1981. – № 4. – С. 78 – 83.
13. Печковский Э. П. Физическое обоснование диаграммы истинная деформация – температура поликристаллических ОЦК-металлов // Там же. – 2000. – № 4. – С. 104 – 118.

Поступила 05. 02. 2004