

## ВЛИЯНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ НЕЙТРОНАМИ И АЛЬФА-ЧАСТИЦАМИ НА СТРУКТУРУ И ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МОЛИБДЕНА И СПЛАВА НА ЕГО ОСНОВЕ

*О.П.Максимкин, О.В.Тиванова*

*Институт ядерной физики НЯЦ РК, г. Алматы, Республика Казахстан*

*e-mail: chakrov@inp1.sci.kz, тел. 7(3272)545-432*

Виконані дослідження змін механічних характеристик та структури зразків молибдену та сплаву на його основі - монібора, рівномірно по об'єму імпантованих гелієм на циклотроні  $\alpha$ -частками до концентрації  $2,7 \cdot 10^{-4} \dots 3,7 \cdot 10^{-3}$  ат.%, а також опромінених нейтронами ( $1023$  нейтр./м<sup>2</sup>) в активній зоні реактора ВВР-К. Показано, що в інтервалі температур деформації  $873 \dots 1473$  К вплив гелію на зменшення характеристик міцності і пластичності молибдена бідш істотне, ніж монібора.

Выполнены исследования изменений механических характеристик и структуры образцов молибдена и сплава на его основе – монибора, равномерно по объему имплантированных гелием на циклотроне  $\alpha$ -частицами до концентрации  $2,7 \cdot 10^{-4} \dots 3,7 \cdot 10^{-3}$  ат.%, а также облученных нейтронами ( $1023$  нейтр./м<sup>2</sup>) в активной зоне реактора ВВР-К. Показано, что в интервале температур деформации  $873 \dots 1473$  К влияние гелия на уменьшение характеристик прочности и пластичности молибдена более существенно, чем монибора.

The changes of mechanical characteristics and the structure were investigated for the samples of molybdenum and its alloy-monibor, pre-irradiated uniformly by volume with either  $\alpha$ -particles at the cyclotron up to the concentration  $2,7 \cdot 10^{-4} \dots 3,7 \cdot 10^{-3}$  at.% or with neutrons ( $1023$  n/m<sup>2</sup>) in the reactor WWR-K-core. It was shown, that at the deformation temperatures  $873 \dots 1473$  K the helium influence on decreasing of characteristics of strength and ductility for molybdenum is stronger than for monibor.

### ВВЕДЕНИЕ

Известно, что тугоплавкие металлы и сплавы на их основе рассматриваются как наиболее перспективные конструкционные материалы для некоторых ответственных узлов термоядерных установок [1]. Предпочтение отдается малолегируемым сплавам вольфрама и молибдена, обладающим в исходном состоянии высоким комплексом механических свойств, который даже после жесткого облучения и температурного воздействия должен обеспечивать надежный запас пластичности и прочности. Однако к настоящему времени все еще недостаточно изучены эффекты влияния облучения нейтронами и заряженными частицами на характеристики прочности и пластичности этих материалов, особенно при повышенных ( $>0,3 T_{пл}$ ) температурах. В этой связи представляло определенный интерес провести сравнительные исследования влияния реакторного и циклотронного облучения на структуру и механические свойства молибдена технической чистоты, а также промышленного сплава на его основе – монибора.

Целью настоящей работы являлось установление закономерностей и выявление особенностей радиационного изменения механических характеристик молибдена и его сплава в зависимости от температуры испытания и концентрации гелия.

### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Объектом для исследования служили: молибден (чистотой 99,96 %) и сплав молибдена с никелем и бором – монибор: Мо – 99,85 %, Ni – 0,05 %, В – 0,002 %, С – 0,004 % (мас.) в виде прокатанных пла-

стин (толщина 0,3 мм). Плоские образцы для механических испытаний в виде двойной лопатки с размерами рабочей части  $10 \times 3,5 \times 0,3$  мм вырубались из пластин с помощью штампа. Термообработка материалов заключалась в отжиге при  $1473$  К в течение 2 ч в вакууме  $2,5 \cdot 10^{-5}$  мм.рт.ст. Средний размер зерен рекристаллизованной структуры как для молибдена, так и для монибора составил  $25 \dots 30$  мкм.

Термообработанные образцы облучали в активной зоне реактора ВВР-К НЯЦ РК флюенсом нейтронов  $1 \cdot 10^{23}$  нейтр./м<sup>2</sup> ( $E > 0,1$  МэВ,  $T < 373$  К). Облучение альфа-частицами с начальной энергией 50 МэВ проводили на изохронном циклотроне У-150 при температуре не выше  $373$  К с использованием специальной методики, обеспечивающей равномерное по объему образца ионное легирование [2] до концентрации гелия в мониборе  $9 \cdot 10^{-4}$  ат.%, в молибдене –  $2,7 \cdot 10^{-4} \dots 3,7 \cdot 10^{-3}$  ат.%.

Механические испытания необлученных, а также облученных нейтронами и имплантированных гелием образцов проводили на разрывной машине горизонтального типа при температурах  $573 \dots 1473$  К со скоростью растяжения  $1,3 \cdot 10^{-3}$  с<sup>-1</sup>. Металлографическое и ПЭМ-исследования структуры исходных, облученных и деформированных материалов осуществляли на микроскопах МеФ-2 и ЖЕМ-100СХ.

Экспериментальные кривые растяжения обрабатывали, применяя специально разработанные алгоритмы и программы, с целью определения характеристик прочности ( $\sigma$ ), пластичности ( $\delta$ ) и других величин, необходимых для создания полной базы данных механических испытаний.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

**Молибден.** На рис.1 представлены типичные диаграммы растяжения исходных и облученных образцов молибдена, а найденные из них характеристики прочности и пластичности приведены в табл.1. Из нее видно, что облучение образцов молибдена альфа-частицами до концентрации в них гелия  $1,2 \cdot 10^{-3}$  ат.% привело к увеличению предела текучести и незначительному изменению предела прочности. В то же время радиационное легирование до большей концентрации гелия незначительно повлияло на значение предела текучести. Видно также, что во всем исследуемом интервале температур наблюдается монотонное уменьшение пределов текучести и прочности образцов молибдена, необлученных и облученных альфа-частицами.

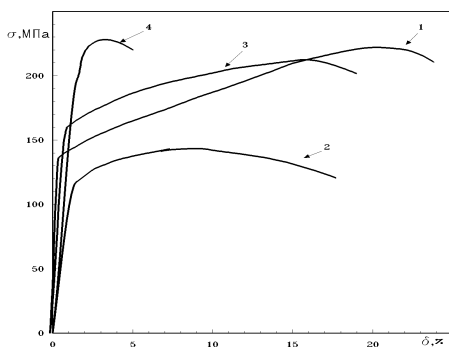


Рис.1. Типичные диаграммы растяжения образцов молибдена исходных (1) и имплантированных гелием до различной концентрации: 2– $2,7 \cdot 10^{-4}$ , 3– $1,2 \cdot 10^{-3}$ , 4– $3,7 \cdot 10^{-3}$  ат.%, деформированных при  $T=1273$  К

Таблица 1

### Механические характеристики молибдена

Вид обработки	$T_{исп.}$ , К	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\delta_p$ , %	$\delta_s$ , %
Необлученный	873	180	320	27	30
Необлученный	1073	140	265	28	29
Необлученный	1273	135	220	22	24
Необлученный	1473	80	120	28	37
Имплантация гелия до концентрации, ат. %					
$2,7 \cdot 10^{-4}$	1273	120	145	10	18
$2,7 \cdot 10^{-4}$	1473	100	130	9	13
$1,2 \cdot 10^{-3}$	873	280	340	20	21
$1,2 \cdot 10^{-3}$	1073	220	270	19	20
$1,2 \cdot 10^{-3}$	1273	160	210	17	19
$1,2 \cdot 10^{-3}$	1473	90	130	13	22
$3,7 \cdot 10^{-3}$	873	205	255	4	5
$3,7 \cdot 10^{-3}$	1073	180	250	6	11
$3,7 \cdot 10^{-3}$	1273	195	230	3	5

При температурах испытания 1273...1473 К предел текучести молибдена, имплантированного до концентрации  $1,2 \cdot 10^{-3}$  ат.% гелием, имеет тенденцию к восстановлению до значения, соответствующего исходному материалу. Одновременно наблюдается значительное уменьшение пластичности.

На рис.2,а показано электронно-микроскопическое изображение структуры необлученного молибдена, деформированного при 1273 К. Для сравнения там же (см. рис.2,б) приведена структура молибдена, деформированного после облучения альфа-частицами: наблюдаются скопления дефектов в виде небольших кластеров и дислокационных петель невысокой плотности. Гелиевые поры в облученных образцах молибдена не обнаружены.

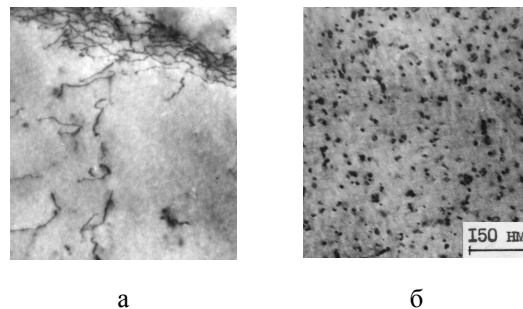


Рис.2. Влияние гелия на структуру молибдена, деформированного при 1273 К: а – исходный, б – имплантированный гелием  $3,7 \cdot 10^{-3}$  ат.%

**Монитор.** Типичные диаграммы растяжения монитора приведены на рис.3, а рассчитанные из них стандартные механические характеристики сведены в табл. 2.

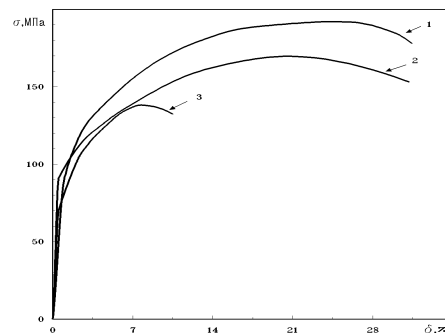


Рис.3. Типичные диаграммы растяжения образцов монитора исходных (1), имплантированных гелием (2), облученных нейтронами (3), деформированных при  $T=1273$  К

Из табл.2 видно, что с ростом температуры испытания значения характеристик прочности и пластичности необлученного и облученного материала монитора монотонно снижаются. Однако в отличие от молибдена уровень пластичности не только исходного, но и имплантированного гелием монитора при повышенных температурах испытания сохраняется довольно высоким. Во всем исследованном диапазоне температур пластичность образцов, облученных

альфа-частицами, практически совпадает с пластичностью необлученных образцов. Так при 1273 К удлинение необлученных и облученных образцов было практически одинаковым (33 %). Облучение нейтронами привело к существенному снижению пластичности при высоких температурах испытания (1273...1473 К), в то время как прочностные характеристики изменились по сравнению с исходными значениями не столь значительно.

Таблица 2

**Механические характеристики молибдена**

Вид обработки	T <sub>исп.</sub> , К	σ <sub>0,2</sub> , МПа	σ <sub>B</sub> , МПа	δ <sub>p</sub> , %	δ, %
Необлученный	573	200	440	38	46
Необлученный	973	150	270	33	34
Необлученный	1073	100	260	38	40
Необлученный	1173	100	230	33	35
Необлученный	1273	90	190	28	33
Необлученный	1373	80	180	26	35
Необлученный	1473	80	150	20	27
Необлученный	1573	50	110	24	30
Имплантация гелия до концентрации, ат. %					
9·10 <sup>-4</sup>	1073	110	230	27	29
9·10 <sup>-4</sup>	1273	90	165	21	33
9·10 <sup>-4</sup>	1473	70	135	17	33
Обл. нейтр./м <sup>2</sup>					
1·10 <sup>23</sup>	1273	70	135	7	11
1·10 <sup>23</sup>	1473	60	105	6	9

Металлографическое изучение поверхности деформированных образцов показало, что пластическая деформация необлученного молибдена во всем исследованном диапазоне температур реализуется внутризерненным скольжением (рис.4,а).

Исследования микроструктуры показали также, что существенное различие характеров деформации и разрушения между облученными и необлученными образцами молибдена и молибдена наблюдается при 1273...1473 К. Оно заключается в том, что интенсивность внутризерненной деформации в облученных материалах незначительна, а разрушение происходит в основном по границам зерен. Кроме того, характерной особенностью структуры облученных деформированных образцов молибденового сплава является наличие множества зернограницных трещин по всей рабочей части образца, ориентированных близко к нормали по отношению к оси растяжения и охватывающих практически всю деформированную область (см. рис. 4,б). Вероятно, более высокое по сравнению с молибденом высокотемпе-

ратурное удлинение образцов молибдена, содержащих гелий, реализуется именно вследствие интенсивного раскрытия множества интеркристаллитных микротрещин, развитие которых длительное время не приводит к образованию магистральной трещины. Вероятнее всего, трещины стопорятся на стыках трех зерен, и их продвижение зависит от угла разориентации кристаллитов на стыке [3]. В то же время для образцов Мо, у которого не наблюдалось подобной разветвленной сети микротрещин, соответствующие значения удлинений оказались равными: 17% (имплантированный до концентрации 2,7·10<sup>-4</sup>ат.%) и 24% (исходный). В образцах, облученных нейтронами, трещины были расположены в основном вблизи зоны разрыва.

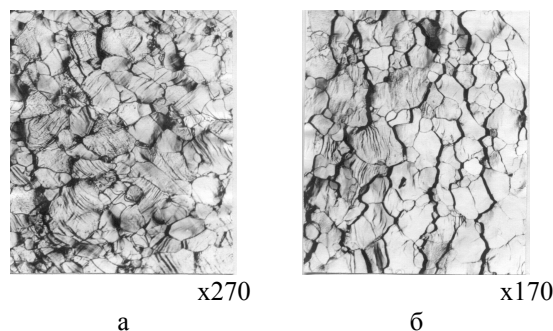


Рис.4. Структура молибдена, деформированного при 1473 К; а – необлученный, б – имплантированный гелием

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Наличие гелия и изменение его концентрации от 2,7·10<sup>-4</sup> до 3,7·10<sup>-3</sup>ат.% оказало значительное влияние на прочность и пластичность молибдена при температурах испытания в диапазоне 873...1473 К и привело к упрочнению и охрупчиванию материал. В то же время имплантация гелия не оказала существенного влияния на высокотемпературные механические свойства молибдена. При этом механизм деформации и характер разрушения молибденового сплава изменяется от внутризерненного к межзеренному.

**ЛИТЕРАТУРА**

1.И.В.Альтовский, В.Л.Бурцев и др. *Исходные принципы и основные направления программы работ по созданию и исследованию материалов термоядерных реакторов*: Препринт НИИЭФА, № П-А-0434, Л.,1979, с.25.  
 2.Г.Т. Ждан, В.Ф. Реутов. *Способ равномерного ионного легирования материалов*: А.с. №591087 СССР, МКИ Н ОИЛ 21/265.  
 3.В.И.Трефилов. А.С.Драчинский и др. Влияние элементов структуры на энергию межзеренного разрушения // *Физика металлов и металловедение*.1983, т.55, №1, с.157-164.