

ных взаимосвязанных радиационных превращений в ядерных реакциях трансмутации и в естественных радиоактивных распадах. Процесс радиационной трансмутации направлен в сторону образования более тяжелых изотопов и элементов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеенко Н.Н., Амаев А.Д., Горынин Н.В. Николаев В.А., Радиационное повреждение стали корпусов водо-водяных реакторов. - М.: Энергоиздат, 1981.-132с.
2. Амаев А.Д., Астафьев А.А., Карк Г.С., Крюков А.М., Маркова С.И. и др. Атомная энергия. - Т. 60. Вып.5, 1986. - С. 321-324
3. Jinchuk D., Asta E.P., Present status of sub-critical cracks investigation applied to safety analysis in Argentina NPP. - Proc. of the Third International Atomic Energy Agency Specialists, Meeting on Subcritical Crack Growth, NHREC/CP -0112. ANL-90/92. vol.2, p. 183- 189.
4. Miller M.K., Jaram R., Russel K.F., Characterization of phosphorus segregation in neutron- irradiated Russian pressure vessel weld. — J. Nucl. Mater., 225(1995)., p. 215-224.
5. Nokata K. and Masaoka I., Salute segregation along non-migrated and migrated grain boundaries during electron in austenitic stainless steels. - J. Nucl. Mater., 150(1987), p. 186-193.

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ СГУСТКОВ ВОДОРОДНОЙ ПЛАЗМЫ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЫСОКОПРОВОДНОЙ МЕДИ**

**И.М. Неклюдов, Н.В. Камышанченко, С.В. Шевченко, В.Ф. Рыбалко,  
Н.Т. Дереповский, В.И. Грицина, В.Ф. Ерко, Г.Н. Малик, В.А. Беленко**

Медь и сплавы на ее основе широко рассматриваются как возможные конструкционные материалы термоядерной энергетики [1].

Основным преимуществом меди при этом является ее высокая электро- и теплопроводность в широком интервале температур. По электропроводности медь уступает только серебру. Наряду с требованиями высокой электро- и теплопроводности к полуфабрикатам из меди предъявляются особые требования по вакуумной плотности, по механической и электрической плотности, по термопрочности, технологичности по содержанию примесей, по стабильности свойств под воздействием термоциклических нагрузок, нейтронного облучения, воздействию плазмы и др.

В соответствии со способом получения и содержанием сторонних ингредиентов, высокопроводные медные материалы условно разделяют на четыре основные группы [1, 2]:

- технически чистая медь;

- твердорастворно упрочненные медные сплавы;
- дисперсно-твердеющие медные сплавы;
- дисперсно-упрочненные медные материалы.

По этой классификации к первой группе материалов относят технически чистую медь, содержащую кроме меди небольшие ( $\leq 0,1\%$  по массе) количества экзогенных и эндогенных примесей. Вторая группа охватывает медные материалы, содержащие элементы, присутствие которых мало сказывается на основном свойстве меди (проводимости), но которые, входя в твердый раствор, упрочняют медный сплав, повышают температуру его размягчения и сопротивление ползучести. Большинство освоенных промышленностью медных сплавов составляет третью группу высокопроводных медных материалов. Медные материалы третьей группы представляют собой пересыщенные твердые растворы, в которых при горячем переделе или при эксплуатации могут формироваться гомогенные выпадения вторых фаз. В этих сплавах, в некоторых случаях, могут формироваться и гетерогенные выпадения, располагающиеся на возникающих в процессе переделов и эксплуатации дефектах кристаллической структуры матрицы. Для материалов третьей группы характерен рост – с увеличением времени выдержки при повышенных температурах, прочности и тепло- и электропроводности, который со временем может выходить на насыщение или достигать максимума.

К четвертой группе по такой классификации принято относить композитные материалы, упрочняемые мелкодисперсными включениями. Такие материалы изготавливаются специальными методами, как например, смешиванием и горячим прессованием мелкодисперсной порошковой шихты, горячей прокаткой и термообработкой порошковых масс, внутренним окислением, специальным образом приготовленных медных сплавов, закалкой специальных сплавов из расплава и др. Типичным представителем материалов четвертой группы является порошковая медь, упрочненная мелкодисперсными окислами алюминия, циркония, гафния, хрома и др. Материалы этой группы проявляют высокие температуры размягчения и превосходное сопротивление ползучести.

Медные материалы каждой из этих групп обладают определенным набором свойств, способным удовлетворять некоторым требованиям, предъявляемым к конструкционным материалам термоядерной установки. Однако некоторые специфические свойства медных материалов, формируемые в специфических условиях эксплуатации, в частности под воздействием плазмы с большим энерговыделением, требуют своей оценки.

Настоящая работа посвящена исследованию процесса формирования механических характеристик медных материалов под воздействием высокоэнергетических сгустков водородной плазмы.

Эксперименты по влиянию воздействия плазмы на формирование свойств медных материалов проводили на импульсном коаксиальном плазменном ускорителе ННЦ ХФТИ «Просвет». Облучение проводили сгустками водородной плазмы с временной протяженностью  $\tau=2\text{мкс}$ , со средней

энергией частиц в сгустке  $E=2$  кэВ и плотностью  $n=10^{14}$  см<sup>-3</sup>. Энергетический спектр ионов в сгустке, формируемом ускорителем «Просвет», близок к энергетическому спектру нейтралов D и T, которые будут попадать на стенку разрядной камеры энергетического термоядерного реактора типа UWMAK-II [4].

Поскольку конкретные условия эксплуатации медных материалов предполагают воздействие на них водородоподобных газов, при выборе объектов исследования было необходимо исключить медные материалы, проявляющие склонность к «водородной хрупкости». Ускоренные испытания материалов на их склонность к «водородной хрупкости» («водородной болезни») проводили в соответствии с ГОСТ 24048-80, используя как метод гибовых испытаний, так и металлографические методы. Исследования проводили после отжига как в вакууме  $2 \cdot 10^{-5}$  мм рт.ст., так и в атмосфере водорода при температурах 850; 950 и 1020<sup>0</sup>С в течение 30 минут.

По результатам исследований типичным представителем материалов первой группы, не склонных к «водородной хрупкости», была выбрана медь электроннолучевой плавки (МВЭ), выплавляемая по ГОСТ 11-80 из шихты МООк. Из материалов второй группы, разработанных в ННЦ ХФТИ [5], был выбран не склонный к проявлению «водородной хрупкости» сплав меди с двумя процентами по массе палладия. Третья группа материалов в данном исследовании представлена не склонными к «водородной хрупкости» сплавами микролегированной меди с добавками иттрия, скандия, циркония. Материалы четвертой группы, ввиду их склонности к проявлению «водородной хрупкости», не прошли предварительного отбора. Химический состав материалов, отобранных для экспериментов по воздействию водородной плазмы, приведен в табл.1.

Таблица1

Материал	Содержание элементов, % по массе $10^{-3}$										
		Zn	Bi	P	As	Si	Fe	Se	Ni	Mg	Al
МВЭ	-	1,2	<1	<1	1,5	2,8	1,80	3,0	0,8	0,9	0,2
МВП	2000Pd	0,5	<1	<1	0,7	1,5	1,80	1,0	2,0	-	0,2
ММВИ	18 Y	0,7	<1	<1	0,7	1,7	0,35	1,0	1,5	0,6	0,2
ММВС	12Sc	0,5	<1	<1	0,7	1,5	0,30	1,0	2,0	0,5	0,2
ММВЦ	20Zr	0,5	<1	<1	0,5	1,2	0,25	1,0	2,0	0,5	0,2
ММВИЦ	20 Y+22Zr	0,2	<1	<1	0,5	1,0	0,40	1,0	2,0	0,5	0,2
ММВИП	100Pd+15Y	0,5	<1	<1	0,7	1,5	0,30	1,0	2,0	-	0,2

Объекты для исследований представляли собой плоские образцы, используемые для механических испытаний, сечением  $3,5 \times 0,3$  мм<sup>2</sup> и длиной рабочей части 12 мм. Образцы изготовлены штамповкой из лент отобранных для исследований материалов. Перед загрузкой в разрядную камеру

плазменного ускорителя поверхности образцов подвергались специальной очистке и термообработке в высоком вакууме при температуре 520°C в течение одного часа.

В разрядной камере плазменного ускорителя образцы помещали в держатели, обеспечивающие в процессе эксперимента устойчивый теплообмен, за счет надежного теплового контакта с охлаждаемой подложкой. Откачка рабочего объема ускорителя осуществлялась диффузионным масляным насосом с азотной ловушкой. Среднестатистическая температура образца в процессе облучения составляла 20+5°C; давление остаточной атмосферы в рабочей камере поддерживалось  $5 \div 7 \times 10^{-6}$  мм рт.ст. При плазменном разряде давление в камере кратковременно повышалось до  $10^{-3}$  мм рт.ст., а локальная температура поверхности образцов в момент разряда, оцененная по методике [6], значительно превышала температуру плавления для массивной кристаллической меди при нормальных условиях.

В плазменном ускорителе образцы обрабатывали до набора суммарной дозы  $1,5 \times 10^{18}$  Н/см<sup>2</sup> (50 импульсов) на каждую из больших плоскостей образца. Перемещение держателей в разрядной камере ускорителя обеспечивало поочередное воздействие водородной плазмы на каждую из плоскостей образца. Поочередное воздействие высокоэнергетичного сгустка плазмы на поверхность образца применялось в этом эксперименте для того, чтобы предотвратить возможное неоднородное накопление внутренних напряжений и деформаций из-за значительного градиента температуры по толщине, возникающего при воздействии сгустка. Дозу и энерговыделение в образцах определяли калориметрическим методом.

Механические свойства материалов, как в исходном состоянии, так и после воздействия сгустков водородной плазмы, определяли при комнатной температуре. Скорость деформации при механических испытаниях образцов составляла  $2 \times 10^{-3}$  с<sup>-1</sup>.

Таблица 2

Материал	Механические свойства							
	До обработки				После плазменной обработки			
	$\sigma_{0,2}, \frac{\text{кг}}{\text{мм}^2}$	$\sigma_B, \frac{\text{кг}}{\text{мм}^2}$	$\delta, \%$	$A \frac{\text{МДж}}{\text{м}^3}$	$\sigma_{0,2}, \frac{\text{кг}}{\text{мм}^2}$	$\sigma_B, \frac{\text{кг}}{\text{мм}^2}$	$\delta, \%$	$A \frac{\text{МДж}}{\text{м}^3}$
МВЭ	4,6	22	70	111,4	16,9	26	29	64,2
МВП	6,6	20	24	33,8	12,9	24	23	43,9
ММВИ	4,4	22	72	114,5	8,2	23	46	79,1
ММВС	9,2	27	22	41,9	17,9	28	21	49,4
ММВЦ	7,0	20	38	56,0	12,0	20	32	53,3
ММВИЦ	7,9	24	29	49,5	16,2	27	26	58,0
ММВИП	6,4	22	35	54,2	12	22	28	49,6

Обработка образцов медных материалов сгустками водородной плазмы с удельным энерговыделением  $10 \text{ Дж/см}^2$  имп. до дозы  $1,5 \times 10^{18} \text{ см}^{-1}$  на каждую большую плоскость образца приводит (см. табл.2) к повышению пределов текучести и прочности и к снижению их пластичности. При этом максимальный прирост предела текучести (см. табл.3) присущ нелегированной электроннолучевой меди (на 267%), в то время как для сплава меди с палладием и сплавов микролегированной химически активными добавками прирост предела текучести значительно меньший (на  $105 \div 88\%$ ). Результаты табл.3 также показывают, что нелегированная электроннолучевая медь в процессе взаимодействия ее со сгустками водородной плазмы значительно теряет пластичность (на 59%), а предел прочности изменяется незначительно: для сплава меди с палладием и для нелегированной электроннолучевой меди он возрастает на 18 – 20%, для микролегированной меди ММВЦ и ММВИП он практически не изменяется.

Таблица 3

Материал	Относительное изменение механических свойств, %			
	$\frac{\Delta\sigma_{0,2}}{\sigma_{0,2}^{исх}}$	$\frac{\Delta\sigma_B}{\sigma_B^{исх}}$	$\frac{\Delta\delta}{\delta^{исх}}$	$\frac{\Delta A}{A^{исх}}$
МВЭ	267	18	-59	-42
МВП	95	20	-4	30
ММВИ	86	5	-136	-31
ММВС	95	4	-5	18
ММВЦ	71	0	-16	-5
ММВИЦ	105	13	-10	17
ММВИП	88	0	-20	-8

Работоспособность материала в жестких условиях удобно характеризовать значениями удельной работы, затрачиваемой на деформацию образца до разрушения. Величина, характеризующая удельную работоспособность материала, несет в себе более полную информацию о состоянии материала и его потенциальных возможностях противостоять внешним воздействиям. При одноосном растяжении работа деформации определяется как «площадь», ограниченная кривой растяжения записанной в истинных координатах [7]. В табл. 3 приведены значения удельной работы, рассчитанные на единицу объема исследуемого образца. Результаты табл.3 показывают, что поведение медных материалов при воздействии на них сгустков водородной плазмы не связано с принадлежностью их к той или иной группе материалов. Их поведение не зависит существенно ни от способа получения материала, ни от механизма действия упрочняющей добавки. Действительно, нелегированная электроннолучевая медь и микролегированная иттрием медь (МВЭ и ММВИ), принадлежащие соответственно к первой и третьей группам материалов, проявляют после воздействия с высокоэнергетичными

сгустками водородной плазмы существенное (на 45 и 31%) снижение удельной работы деформации образца и снижение (на 59 и 36%) относительного удлинения, сопровождаемое некоторым повышением прочностных характеристик. В то же время, медь, легированная палладием, относящаяся ко второй группе материалов, так же как и микролегированные медные сплавы, содержащие микродобавки скандия, иттрия и циркония (ММВС6-ММВИЦ), относящиеся к третьей группе, проявляет, после взаимодействия с водородной плазмой, повышение удельной работы деформации при незначительном повышении предела прочности и некотором снижении относительного удлинения.

Для уяснения возможного механизма воздействия сгустков водородной плазмы на изменение механических характеристик медных материалов было проанализировано поведение микротвердости и электрического сопротивления постоянному электрическому току исследуемых медных материалов. Оказалось, что измерениями микротвердости и электросопротивления внутренних сечений образцов влияние плазменной обработки на медные материалы не обнаруживается, в то время как изменение микротвердости поверхностных слоев материалов плазменная обработка проявляет существенно (см. табл. 4). Сопоставление результатов табл. 3 и 4 показывает, что относительное изменение микротвердости поверхностных слоев материалов качественно повторяет относительные изменения, наблюдаемые для удельной работы деформации при одноосном растяжении.

Таблица 4

Материал	Микротвердость поверхности образцов			Коэффициент эрозии, ат/ион
	до обработки	после обработки	Относительное изменение, %	
МВЭ	47,6	68,1	43	5,4
МВП	56,6	62,8	11	6,6
ММВИ	51,2	67,1	31	4,2
ММВС	68,1	72,9	7	4,1
ММВИЦ	61,3	72,3	18	4,7
ММВИЦ	55,3	64,1	16	4,2
ММВИП	56,6	74,1	31	4,8

Приведенные результаты дают возможность сделать вывод, что механические характеристики, формируемые в процессе воздействия на медные материалы сгустков высокоэнергетической водородной плазмы, в существенной мере определяются состоянием поверхностного слоя материала.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. G.J. Butterworth and C.B.A. Forty. A storvey of the propertus of copper alloys for use as fusion reactor materials.

2. Чернышева Ю.П., Берин И.Ш. Свойства меди и медных сплавов.– Алма-Ата: Наука, 1975.
3. Беликов А.Г. и др.//ЖТФ.–41 Вып 9.–С.1881-1886.
4. R.Conn, J Kesnor//J. Nuclear Materials.–1976.–V63, p1-14
5. Катаев Р.С., Тронь А.С., Шевченко С.В., Неклюдов И.М. Сплав на основе меди. Патент РФ, 10.03.95. Бюл. №7.
6. С.М. Mc. Kraken, P.E. Scott// Nuclear Fusion.–1979–V19,–p889-981.
7. Золоторевский В.С. Механические свойства металлов. – М.: Металлургия, 1983. – 352с.

## **ВЛИЯНИЕ СГУСТКОВ ВОДОРОДНОЙ ПЛАЗМЫ НА ФОРМИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЫСОКОПРОВОДНОЙ МЕДИ**

**И.М. Неклюдов, Н.В. Камышанченко,  
С.В. Шевченко, В.А. Беленко**

Конструкционные материалы энергетических установок должны обеспечивать надежные эксплуатационные свойства этих установок в течение длительного срока их эксплуатации. Чисто экспериментально подобрать такие материалы, и в особенности для термоядерных установок, практически невозможно. Возникла необходимость в развитии адекватных методов моделирования и прогнозирования эксплуатационной стойкости материалов в условиях воздействия на них высоких механических, термических и радиационных полей. Для решения такой задачи необходимо направлять усилия на осознание кинетики процессов, протекающих в материале при воздействии на него интенсивных полей; на построение более общих моделей таких явлений; на разработку методов оценки уровня адекватности имитационных испытаний, проводимых на плазменных ускорителях и ускорителях заряженных частиц.

В работе [1] приведены результаты исследований процессов формирования механических характеристик медных материалов под воздействием высокоэнергетичных сгустков водородной плазмы, генерируемых плазменным ускорителем ННЦ ХФТИ «ПРОСЕТ». Экспериментально показано, что механические характеристики, формируемые в процессе воздействия на медные материалы сгустков высокоэнергетичной плазмы, в значительной мере определяются состоянием поверхностного слоя исследуемого материала.

Несмотря на то, что чувствительность эксплуатационных характеристик конструкционных материалов к воздействию внешних сред вызывает пристальное внимание специалистов-материаловедов, роль и механизмы влияния поверхностных слоев на механические характеристики материалов изучены недостаточно. Повышение и снижение напряжений течения, хруп-