

## ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРОВАНИЯ ИТТРИЕМ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЧИСТОЙ МЕДИ

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

ННЦ "ХФТИ", БГУ

Изучено влияние микродобавок иттрия (0,01-0,03 вес.%) на механические свойства и электропроводность меди. Показано, что легирование приводит к улучшению прочностных и пластических характеристик исходной меди. Исследовано изменение свойств деформированной прокаткой чистой и микролегированной меди при отжиге. Установлено, что легирование меди иттрием повышает термическую стойкость образцов.

Результаты исследований объясняются процессами взаимодействия дислокаций с атомами примеси и свойствами границ зерен.

Чистая медь и ее сплавы находят широкое использование в электронной, ускорительной, электровакуумной и других отраслях техники. Высокие электро- и теплопроводность меди являются основным преимуществом среди других материалов. В последнее время особый интерес к меди и ее сплавам возник в связи с перспективностью их использования в теплоотводящих системах энергонапряженных элементов термоядерных реакторов, в том числе дивертора ИТЭР [1].

По тепло- и электропроводности, естественно, наиболее удовлетворяющей является высокочистая медь, рафинируемая различными способами вакуумной плавки. Но уменьшение общего количества примесей в высокочистой меди сопровождается снижением ее прочности и термической стойкости, повышением неоднородности структуры по размеру зерна. Это затрудняет получение из чистой меди деталей штамповкой с глубокой вытяжкой и обработкой резанием с высокой точностью. Поэтому возникла необходимость повышения прочности и термической стойкости меди без существенного изменения электрофизических свойств. Существуют различные способы достижения этой цели: предварительная деформация, закалка с предплавильных температур, механико-термическая обработка и др. [2,3]. Однако наиболее эффективным способом достижения сочетания комплекса необходимых прочностных, технологических и электрофизических характеристик меди является микролегирование определенными химически активными элементами.

В качестве рафинирующего, модифицирующего и микролегирующего воздействия на чистые металлы и сплавы широкое применение нашли лантаниды: иттрий, скандий, гафний и другие редкоземельные элементы [РЗЭ] [3-6]. К наиболее важным последствиям введения РЗЭ в металлы относятся: взаимодействие с газовыми и некоторыми вредными примесями, приводящее к очистке матрицы и границ зерен; улучшение пластических характеристик и снижение температуры вязко-хрупкого разрушения, повышение температуры рекристаллизации и уменьшение размера зерна; увеличение степени дисперсности кристаллизующихся фаз; повышение стойкости по отношению к коррозионному и радиационному воздействиям [4-8].

В настоящей работе представлены результаты исследований изменения прочностных и пластических характеристик чистой и микролегированной меди при отжиге.

## Материалы и методика

Объектами исследований являлись образцы чистой меди (МВЭ) и меди, микролегированной добавками (0,01-0,03 вес.% по массе иттрия) (ММВ). Химический состав исследуемой меди приведен в табл. 1.

Таблица 1  
Химический состав исследуемой меди (в % по массе  $\times 10^{-3}$ )

	Y	Zn	Bi	P	As	Si	Fe	Sc	Ni	Mg	Al	Na
МВЭ	-	1,0	<1	<1	0,5	2,3	0,3	0,8	0,4	1,3	0,2	1
ММВ	10											
ММВ	20	0,7	<1	<1	0,7	1,7	0,4	-	0,4	0,6	-	-
ММВ	30											

Образцы для исследований структуры и механических свойств вырезались из лент, полученных прокаткой темплетов из соответствующих плавок до толщины примерно 0,3 мм. Общая деформация лент изменялась от 40 до 90%. Металлографические исследования проводились на оптическом микроскопе МИМ-7.

Механические свойства меди определялись при растяжении образцов со скоростью  $2 \times 10^{-3}$  1/с на разрывной установке типа [9]. Образцы для механических испытаний изготавливались штамповкой из лент толщиной до 0,2 мм и имели прямоугольную форму с размерами рабочей части 25  $\times$  2,5 мм. Ось образцов совпадала с направлением прокатки лент.

Исследовались механические свойства образцов чистой и микролегированной меди в зависимости от степени предварительной деформации прокаткой (40-90 %) и температуры последующего отжига в течение одного часа при температурах в интервале 150-160°C.

Часть образцов перед испытаниями отжигалась при температуре 520°C в течение одного часа. Изучалась температурная зависимость пределов текучести, прочности и относительного удлинения этой партии образцов. Температура испытаний менялась от 20 до 600°C.

Электросопротивление определялось с использованием четырехточечной методики на базе потенциометра Р-348. В токовой цепи образца использовали стабильный источник питания П-138. Максимальная чувствительность установки для определения электросопротивления составляла  $2 \times 10^{-9}$  Ом. Измерения проводились на образцах размером (0,2  $\times$  2,5  $\times$  40 мм), вырезанных из темплетов слитков. Предварительно образцы отжигались в вакууме при 520°C в течение одного часа. Скорость охлаждения образцов после отжига составляла 70°C в минуту.

## Результаты и их обсуждение

### а) Механические свойства меди МВЭ и ММВ

Исследовались механические свойства образцов чистой и микролегированной меди, прокатанных с суммарным обжатием 40, 60 и 90% и отожженных при температурах 300, 500, 600°C в течение одного часа и при 950°C в течение 30 минут.

$\sigma$ , МПа

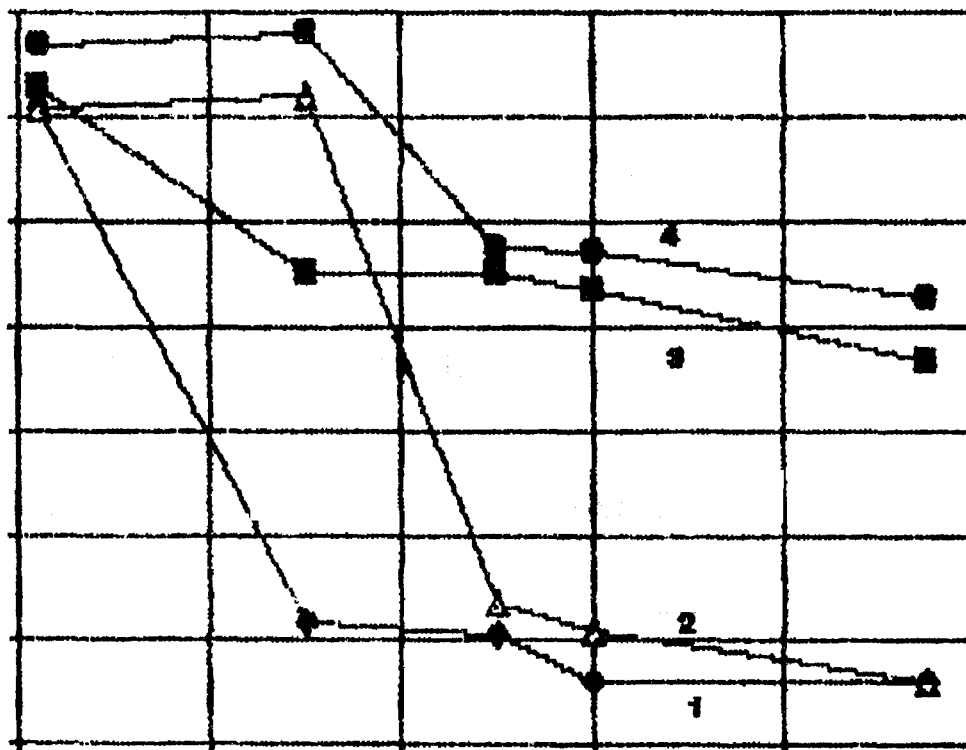


Рис. 1. Зависимость предела текучести  $\sigma_{0,2}$  (1- МВЭ, 2 - ММВ с 0,02% иттрия) и предела прочности  $\sigma_A$  (3 - МВЭ, 4 - ММВ) от температуры отжига для образцов чистой и микролегированной меди. Предварительная деформация 40%.

Из табл.2 и рис. 1, 2 видно, что микролегирование меди добавками иттрия повышает пределы текучести и прочности образцов меди, причем наибольший эффект проявляется при внесении в медь 0,02% иттрия. Оптимальная деформация - 40-60%. В случае предварительной деформации на 90% при концентрации иттрия менее 0,02% прочностные свойства меди практически не изменяются, в то время как пластичность образцов ухудшается.

Таблица 2

Механические свойства меди, предварительно деформированной прокаткой на различную степень и отожженной при 300, 500, 600 и 950°C

Медь	t, °C	40%			60%			90%		
		$\sigma_{0,2}$ МПа	$\sigma_D$ МПа	$\delta$ , %	$\sigma_{0,2}$ МПа	$\sigma_D$ МПа	$\delta$ , %	$\sigma_{0,2}$ МПа	$\sigma_D$ МПа	$\delta$ , %
МВЭ	20	305	315	3,5	307	354	3,5	371	432	3,7
	300	59	226	64,0	64	242	66,5	74	223	59,0
	500	52	226	67,0	46	216	70,0	46	190	53,0
	600	30	218	72,0	35	212	68,0	34	178	48,0
	950	30	185	41,0	25	182	40,5	16	140	56,0

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
MMB 0,01% Y	20	304	321	2,9	302	359	4,0	378	432	2,7
	300	300	311	5,2	237	300	15,0	63	224	46,0
	500	55	227	66,0	52	229	68,0	53	192	48,0
	600	42	227	66,0	44	226	70,0	41	179	47,0
	950	29	195	48,0	28	190	56,0	24	145	60,0
MMB 0,02% Y	20	305	335	2,7	344	375	2,0	366	417	3,0
	300	310	341	6,0	311	337	6,0	157	255	28,0
	500	68	238	65,0	60	242	68,0	59	217	60,0
	600	55	237	66,0	53	237	69,0	48	207	55,0
	950	30	215	61,0	26	208	60,5	29	165	58,0

Наибольшее различие между пределами текучести образцов с различной концентрацией легирующей примеси наблюдается в области температур ниже  $0,3 T_{пл}$  (рис. 2). Это можно объяснить изменением поведения границ при различных температурах отжига [10]. Атомы иттрия под действием упругих полей вокруг дислокаций образуют в околодислокационной области примесные атмосферы, что способствует закреплению дислокаций. Поэтому при более высокой концентрации примеси число закрепленных дислокаций увеличивается. При температурах отжига ниже  $300^\circ\text{C}$  диффузионные процессы развиты слабо и их роль с точки зрения вклада в деформацию незначительна. При более высоких температурах отжига границы зерен могут служить активными стоками дефектов решетки, что способствует росту числа подвижных дислокаций вследствие ухода атомов примеси на границы.

$\sigma$ , МПа

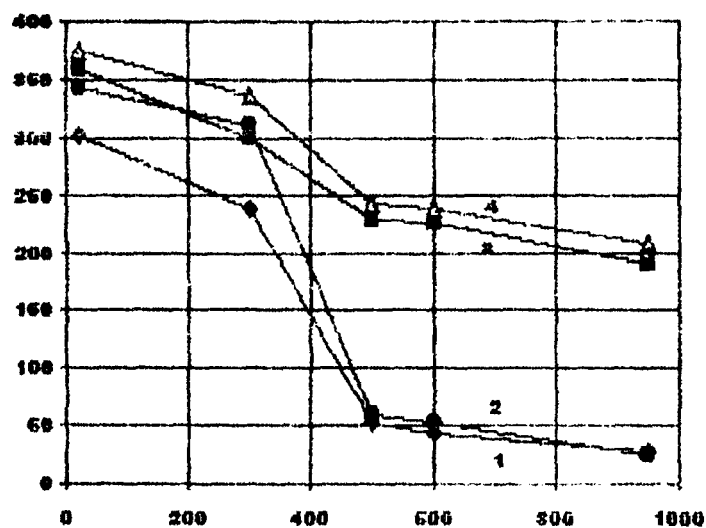


Рис. 2. Зависимость предела текучести  $\sigma_{0,2}$  (1 - МВВ с 0,01%, 2 - МВВ с 0,02% иттрия) и предела прочности  $\sigma_A$  (3 - МВВ с 0,01%, 4 - МВВ с 0,02% иттрия) от температуры отжига образцов. Предварительная деформация 60%.

В табл.3 приведены значения пределов текучести, прочности и относительного удлинения для образцов меди МВЭ и ММВ с 0,02% иттрия, деформированных на 50% и отожженных в течение одного часа при температурах от 150 до 700°C.

Таблица 3  
Механические свойства меди, предварительно деформированной прокаткой на 50% при различных температурах отжига

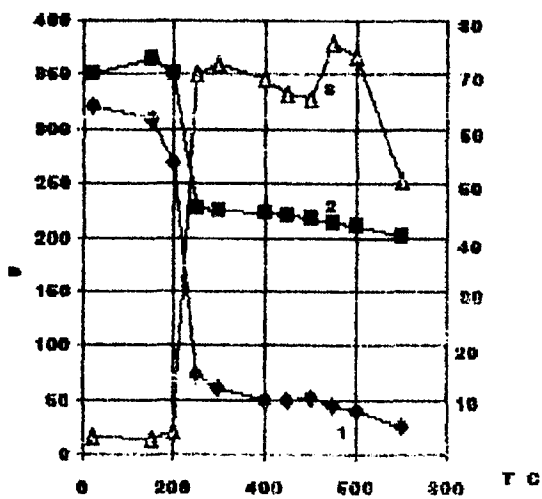
t, °C	МВЭ			ММВ		
	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_D$ , МПа	$\delta$ , %	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_D$ , МПа	$\delta$ , %
20	320	352	3,2	344	362	4,0
150	309	364	2,8	366	404	3,6
200	268	352	4,0	371	406	4,2
250	72	228	70,4	368	402	5,0
300	60	224	72,0	334	392	6,8
400	49	223	69,2	182	280	38,8
450	48	220	66,4	78	248	70,0
500	52	218	65,6	69	245	69,2
550	44	214	76,0	68	242	68,4
600	39	211	73,4	63	240	67,6
700	26	202	50,4	45	228	66,8

$\sigma$ , МПа

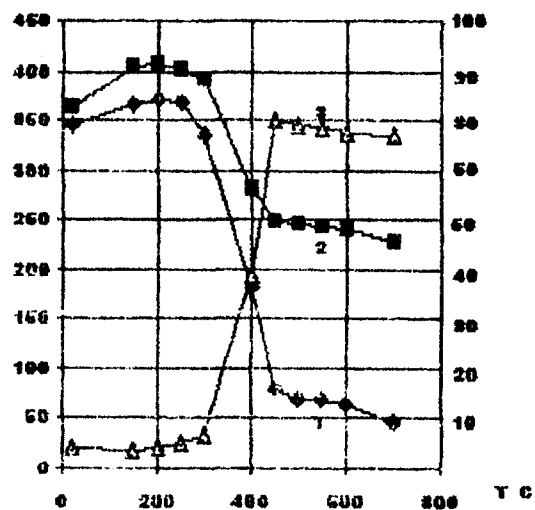
$\delta$ , %

$\sigma$ , МПа

$\delta$ , %



а



б

Рис.3. Зависимость предела текучести  $\sigma_{0,2}$  (1), предела прочности  $\sigma_A$  (2) и относительного удлинения  $\delta$  (3) от температуры часового отжига образцов меди МВЭ (а) и ММВ с 0,02% иттрия (б), предварительно деформированных прокаткой на 50%.

Особенно заметное различие в величинах пределов текучести образцов меди МВЭ и ММВ наблюдается после отжига при 150 и 500-600°C. Важным показателем термической стойкости материалов является так называемая температура полуразупрочнения, т.е. температура, отжиг при которой вдвое снижает предел текучести деформированных, в нашем случае, образцов меди. Микродобавка в медь иттрия до 0,02% повышает температуру полуразупрочнения деформированных прокаткой на 50% образцов с 220 (для чистой меди) до 400°C (рис.3). С увеличением степени деформации выше 70% наблюдается снижение температуры полуразупрочнения, хотя различие ее для чистой и микролегированной меди сохраняется.

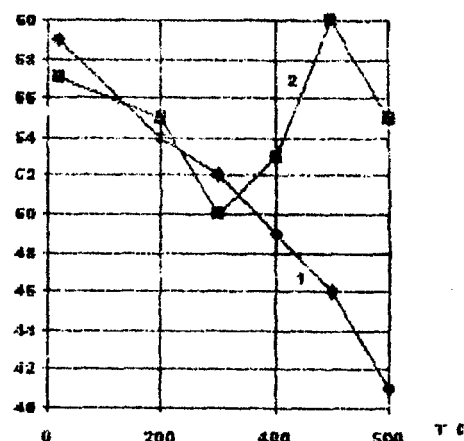
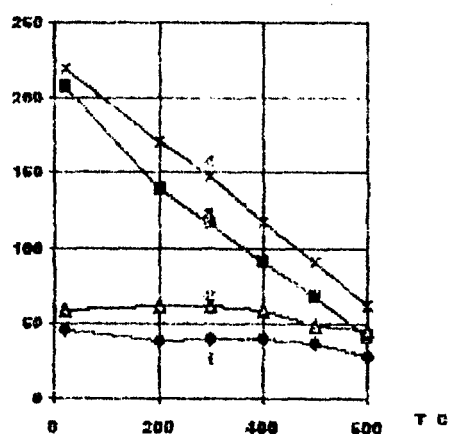
Температурная зависимость пределов текучести, прочности и относительного удлинения образцов меди МВЭ и ММВ, предварительно отожженных в течение одного часа при 520°C, представлены в табл.4 и на рис.4.

Таблица 4  
Механические свойства образцов меди МВЭ и ММВ при различных температурах

	Температура испытаний, С	$\sigma_{0,2}$ , Па	$\sigma_D$ , Па	$\delta$ , %
МВЭ	20	46	208	59
ММВ		59	219	57
МВЭ	200	38	139	54
ММВ		62	171	55
МВЭ	300	39	116	52
ММВ		61	147	50
МВЭ	400	40	91	49
ММВ		58	117	53
МВЭ	500	36	67	46
ММВ		48	91	60
МВЭ	600	28	41	41
ММВ		45	62	55

$\sigma$ , МПа

$\delta$ , %



а

б

Рис.4. Температурная зависимость предела текучести  $\sigma_{0,2}$  (1 - МВЭ, 2 - ММВ с 0,02% иттрия), предела прочности  $\sigma_A$  (3 - МВЭ, 4 - ММВ с 0,02% иттрия) (а) и относительного удлинения  $\delta$  (1 - МВЭ, 2 - ММВ с 0,02% иттрия) (б).

Из рис.4 видно, что лучшим сочетанием прочностных и пластических характеристик обладает микролегированная медь. Причем, если у меди МВЭ пластичность при повышении температуры испытания уменьшается, то у микролегированной при температурах выше 300°C наблюдается увеличение относительного удлинения, что отмечалось и для меди с концентрацией иттрия 0,03 вес.% [8], что определяется упрочнением границ зерен [10].

Увеличение значений основных механических характеристик - предела текучести, предела прочности и относительного удлинения меди - может быть связано с твердорастворным упрочнением, а также с особенностями микроструктуры легированной меди.

Естественно предположить, что влияние малых добавок иттрия связано со степенью закрепления дислокаций их упругим, а возможно, и электрическим взаимодействием с примесными атомами. Но, вследствие малого различия валентностей Cu-Y ( $\Delta Z = 1$ ), величина электрического взаимодействия мала. С другой стороны, разность атомных радиусов  $\Delta R_a = 5,4$  нм значительна ( $R_{a(Cu)} = 12,7$  нм,  $R_{a(Y)} = 18,1$  нм). Поэтому изменение механических свойств в большей мере определяется упругим взаимодействием из-за размерного несоответствия атомов иттрия и меди.

Наряду с этим на механические свойства многих металлов и сплавов влияет средняя величина зерна  $d$  и, согласно уравнению Холла-Петча:

$$\sigma_0 = \sigma_0 + k \frac{1}{\sqrt{d}} \quad (1)$$

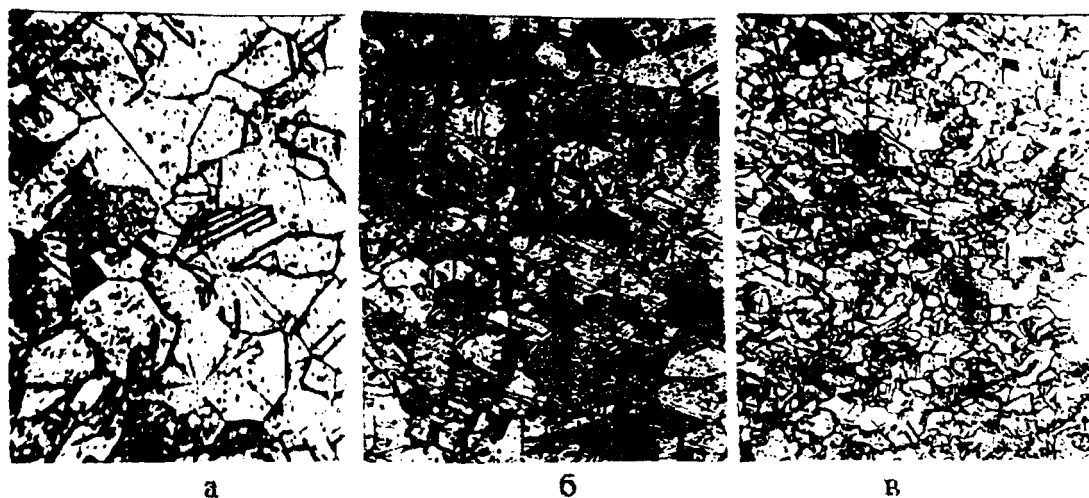


Рис.5. Микроструктура исходной меди (а) и разбавленного сплава ММВ с 0,01% (б) в 0,02% (в) иттрия.

Микролегированная медь, деформированная на 40%, после отжига при 600°C в течение одного часа имеет более однородную и мелкозернистую микроструктуру по сравнению с нелегированной (рис.5). Средний размер зерна в "чистой" меди составлял ~ 50 мкм, в ММВ с 0,01% - 25 мкм и в ММВ с 0,02% около 15 мкм. Так как для медных поликристаллов со слабо выраженной текстурой  $\sigma_0$  хорошо согласуется с уравнением (1) [11, 12], значит изменение, величины зерна вследствие микролегирования иттрием оказывает влияние на свойства меди.

## б) Электропроводность чистой и микролегированной меди

Определялись величины удельного электросопротивления образцов чистой и микролегированной меди при температурах 300 и 4,2 К ( $\rho_{300\text{К}}$  и  $\rho_{4,2\text{К}}$ ). В табл.5 приведены результаты измерений удельного и относительного остаточного электросопротивления

$$\gamma = \frac{\rho_{300\text{К}}}{\rho_{4,2\text{К}}}$$
 для образцов трех партий. Видно, что существует соответствующий разброс

величин электрических характеристик у образцов чистой и микролегированной меди. Микролегирование меди при вакуумной плавке добавками иттрия сокращает интервал разброса, но незначительно повышает нижнее и понижает верхнее значения относительного остаточного электросопротивления по сравнению с нелегированной медью.

Таблица 5

Значения удельного и относительного остаточного электросопротивления меди МВЭ и ММВ

Медь	$\rho_{300\text{К}}$ , Ом м * $10^{-9}$	$\gamma$
МВЭ	16,86 - 17,61	120 - 375
ММВ (0,01% Y)	16,90 - 17,43	155 - 240
ММВ (0,02% Y)	16,93 - 17,52	160 - 262

## Выводы

1. Исследованы механические свойства образцов чистой и микролегированной меди в зависимости от степени предварительной деформации, температуры отжига и испытаний. Показано, что наибольший эффект наблюдается при концентрации иттрия 0,02% и предварительной деформации 40-60%.

2. Микролегирование меди способствует формированию при отжиге мелкозернистой, более однородной структуры, повышает термическую стойкость структуры, в частности, температуру полуразупрочнения почти вдвое.

3. Улучшение прочностных и пластических характеристик разбавленного сплава медь-иттрий обусловлено упругим взаимодействием дислокаций с атомами примеси вследствие размерного несоответствия, уменьшением среднего размера зерна и свойствами границ зерен.

4. Таким образом, оптимальным сочетанием прочностных свойств и электрических характеристик обладает медь, микролегированная добавками 0,01-0,02 вес. % иттрия.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Горынин И.В., Глухих В.А., Рыбин В.В. Конструкционные материалы, первой стенки бланкета и дивертора, разрабатываемого в России в обеспечение проектирования ИТЭР//Радиационное воздействие на материалы термоядерных реакторов. Ч.1. -СПб.: ЦНИИ КМ "Прометей», 1992. -С. 4-34.

2. Лазарева М.Б. Исследование структуры, свойств и процессов возврата в меди, прокатанной при 4,2-300К. Автореферат дис. -Свердловск: ИФМ АН СССР, 1970. -20 с.

3. Гуляев Б.Б., Камышанченко Н.В., Неклюдов И.М., Паршин А.М. Структура и



свойства сплавов. -М.: Металлургия, 1993. -317 с.

4. Савицкий Е.М. Перспективы развития металловедения. -М.: Наука, 1972.

5. Буравихин В.А., Прытов М.В., Демиденко В.С. О роли структуры ближайшего окружения атомов РЗМ в явлении модифицирования//Изв. АН СССР. Металлы. -1984. -№ 1. -С. 69-71.

6. Зеленский В.Ф., Неклюдов И.М. Влияние РЗЭ на радиационную стойкость материалов//Радиационное материаловедение. -Т.2. -Харьков: ХФТИ, 1990. -С. 45-57.

7. Иванов Л.И., Лазоренко В.И., Платов Ю.М. Радиационная стойкость сплавов системы Al-Mg-Sc//ФиХОМ. -1989. -№ 6. -С. 9-11.

8. Неклюдов И.М., Ожигов Л.С., Пархоменко А.А., Савченко В.И., Шевченко С.В. Радиационное охрупчивание меди, легированной иттрием//ВАНТ. Сер.: ФРП и РМ. -1996. -Вып. 1(64). -С. 16-20.

9. Неклюдов И.М., Камышанченко Н.В., Бобонец И.И., Кононыхин В.А., Поскачей А.Н. Малогабаритная разрывная установка//Сб. Исследование сопротивления материалов и конструкций. -Вып.10. -М., 1975. -С. 63-67.

10. Кайбышев О.А., Валиев Р.З. Границы зерен и свойства металлов. -М.: Металлургия, 1987.

11. Ono Naboru, Karashima Seiichi. Grain size dependence of flow stress in copper polycrystals//*"Scr. met"*. -1982. -V.16. -№ 4. -P. 381-384.

12. Hansen N., Ralph B. The strain and grain size dependence of the flow stress of copper// *"Acta met."*. -1982. -V.30. -№ 2. -P. 411-417.