

УДК 539.4

ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК ИТТРИЯ И ПАЛЛАДИЯ НА ЗАКАЛОЧНОЕ УПРОЧНЕНИЕ МЕДИ

Н.В. Камышанченко^{1}, И.А. Беленко¹⁾, И.М. Неклюдов²⁾*

¹⁾*Белгородский государственный университет*

²⁾*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»*

Представлены результаты экспериментальных исследований влияния радиуса легирующей добавки на закалочное упрочнение меди. В эксперименте использовались образцы чистой меди (99,999 вес. %) и меди с добавками. Установлено различие в величине закалочного упрочнения образцов меди с добавками иттрия и палладия. Это объясняется зависимостью процессов взаимодействия атомов примеси с собственными дефектами кристаллической решетки меди от величины атомного радиуса легирующих элементов.

Введение

Исследование металлов с неравновесной концентрацией точечных дефектов (закалочных вакансий и примесных атомов) представляет интерес как с точки зрения изучения процессов взаимодействия закалочных вакансий, атомов примеси друг с другом и с исходными дефектами кристаллической решетки, определения их энергетических и конфигурационных характеристик, так и для направленного воздействия на физико-механические свойства материала [1].

Важным представляется выявление влияния закалки на структуру и механические свойства металлов, содержащих малые количества примесных элементов, не приводящих к существенному изменению электрофизических свойств. Установлено, что микролегирование меди иттрием приводит к повышению предела текучести исходной и закаленной меди, что обусловлено упругим взаимодействием дислокаций с атомами примеси [2,3].

Целью настоящего исследования было установление влияния атомов примеси с различным атомным радиусом на величину закалочного упрочнения меди.

Материалы и методика

Объектами исследований изменения предела текучести являлись образцы чистой меди (МВЭ), меди, микролегированной добавками (0,02 % по массе иттрия) (МВ+Y) и легированной добавками (2% по массе палладия) (МВ+Pd). Чистая медь выплавлялась в вакуумной электроннолучевой печи ННЦ ХФТИ. Легирование проводилось во время индукционной плавки.

Выбор легирующих добавок объясняется возможностью выявления механизмов закалочного упрочнения материала со сравнимым (палладий), по отношению к меди, и большим (иттрий) атомным радиусом.

* E-mail: kamysh@bsu.edu.ru

При исследовании закалочного упрочнения чистой и легированной меди сравнивались свойства образцов нескольких партий:

а) исходных образцов (отожженных при 800°C в течение 30 мин в вакууме с последующим медленным охлаждением со скоростью 10°C/мин);

б) закаленных (от температуры 1000°C в охлажденное до 0°C масло).

Использовались плоские образцы сечением 2,5 x 0,2 мм² с длиной рабочей части 40 мм.

Химический состав исследуемой меди приведен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав исследуемой меди (в % по массе x10⁻³)

	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
МВ+Y	20	0,7	<1	<1	0,7	1,7	0,4	–	0,4	0,6	–	–
МВ+Pd	2000	0,5	<1	<1	0,7	1,5	1,8	1,0	2,0	–	0,2	

Результаты исследований и их обсуждение

С целью выяснения влияния легирующих добавок иттрия и палладия на эффект закалочного упрочнения меди изучали температурную зависимость предела текучести исходных и закаленных образцов чистой и легированной меди.

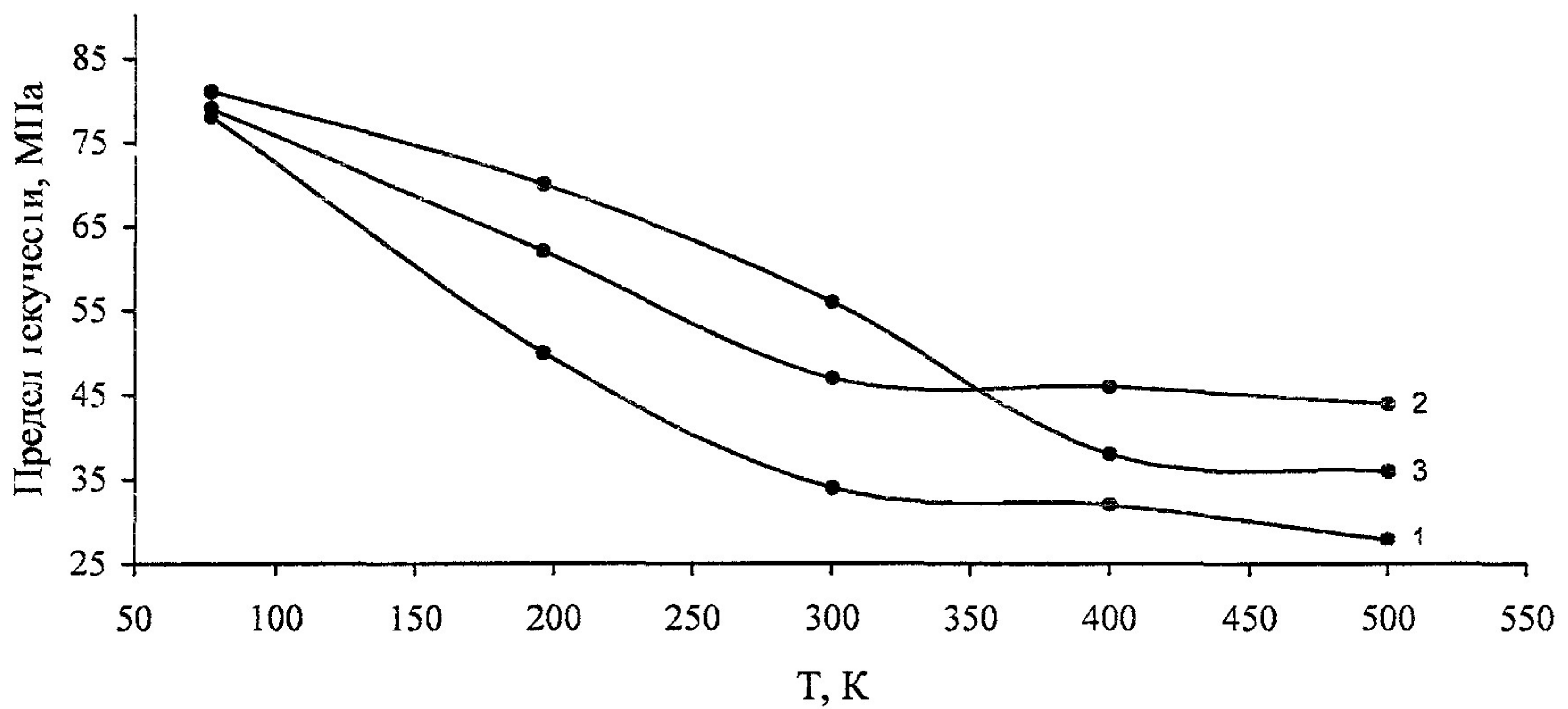
Проведенные испытания показывают (табл. 2, рис. 1, 2), что легирование меди приводит к повышению предела текучести σ_s (начало отклонения от линейной зависимости) исходной и закаленной меди.

Таблица 2

Предел текучести исходной и закаленной чистой и легированной меди

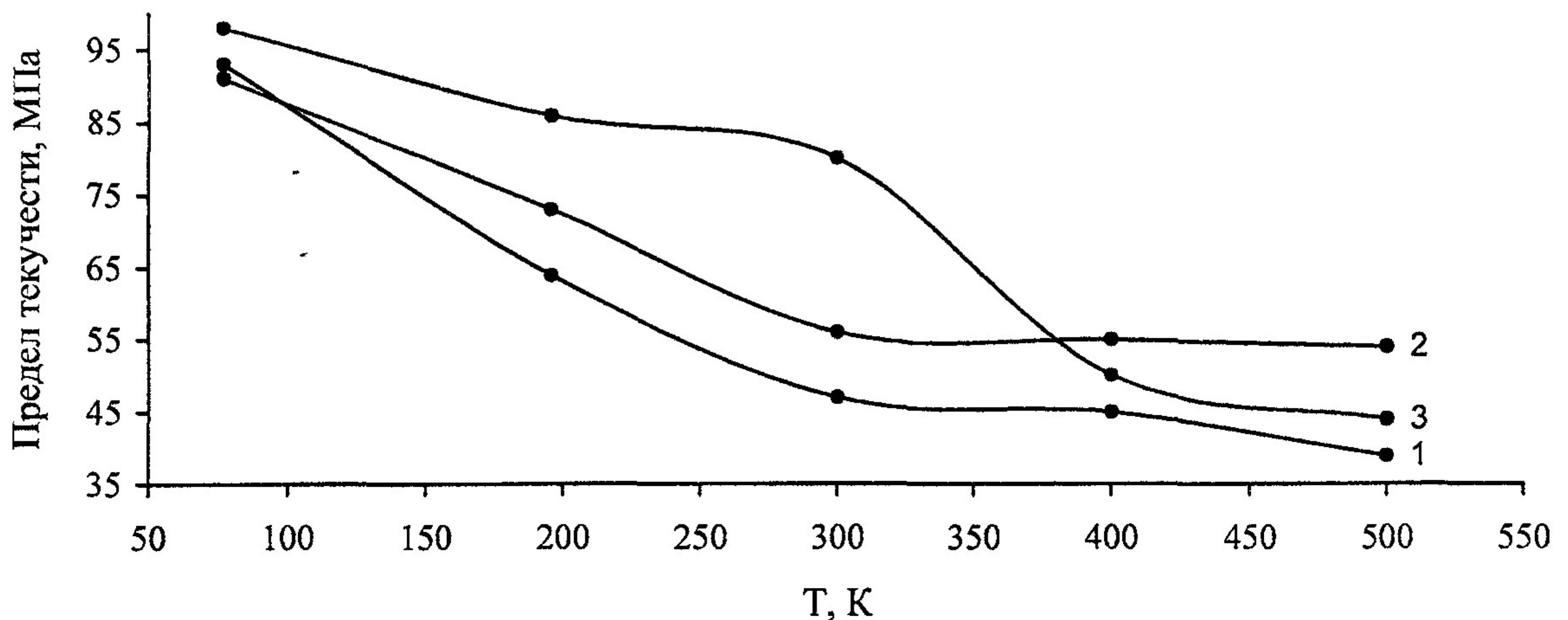
Тип меди	Температура испытаний, К	σ_s , МПа исходной меди	σ_s , МПа закаленной меди	$\Delta\sigma$, МПа
МВЭ	77	78	93	15
МВ+Y		79	91	12
МВ+Pd		81	98	17
МВЭ	196	50	64	14
МВ+Y		62	73	11
МВ+Pd		70	86	16
МВЭ	300	34	47	13
МВ+Y		47	56	9
МВ+Pd		56	80	14
МВЭ	400	32	45	13
МВ+Y		46	55	9
МВ+Pd		38	50	12
МВЭ	500	28	39	11
МВ+Y		44	54	10
МВ+Pd		36	44	8

Рост величины предела текучести микролегированной иттрием меди связан с твердорастворным упрочнением, с закреплением дислокаций примесными атомами.



Р и с . 1 . Температурная зависимость предела текучести образцов исходной чистой (1), микролегированной иттрием (2) и легированной палладием (3) меди

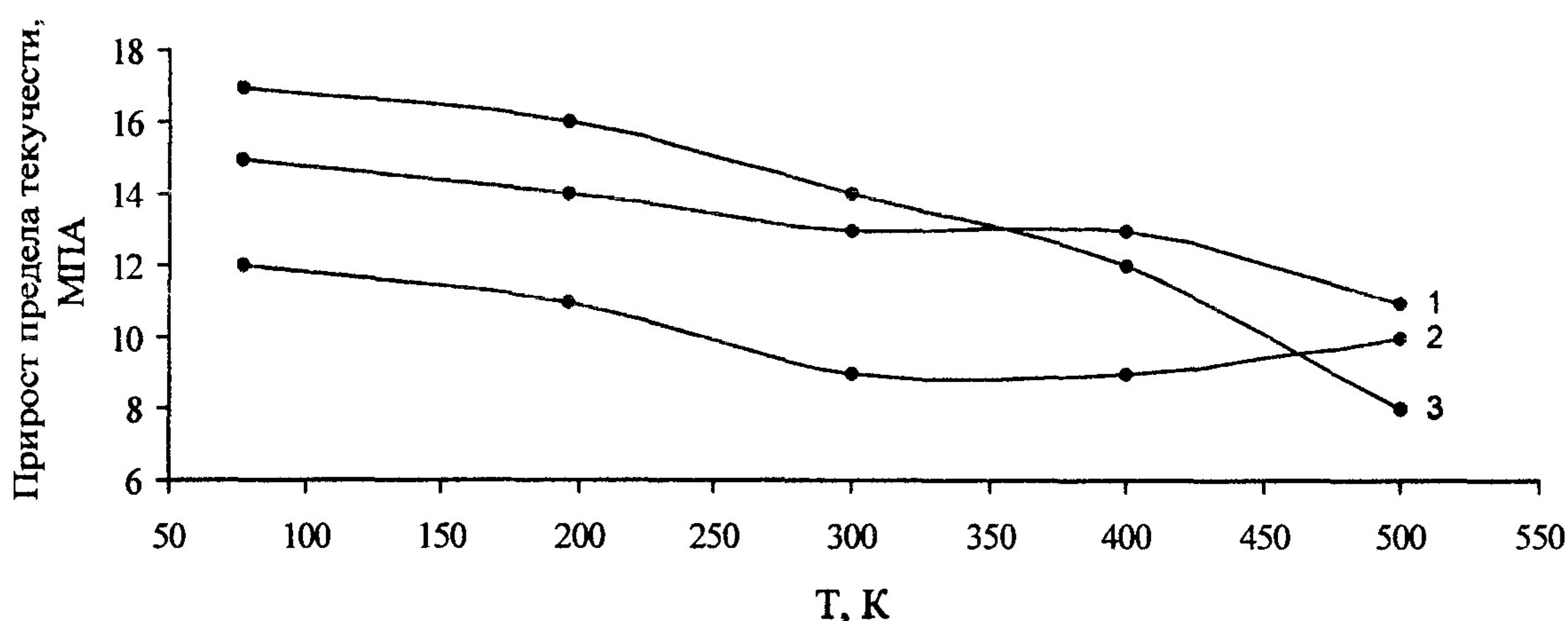
Закалка увеличивает предел текучести как чистой, так и легированной меди. При этом отмечается различие в величинах закалочного упрочнения чистой и легированной меди: величина эффекта закалочного упрочнения в микролегированной иттрием меди меньше, чем у чистой; у легированной палладием – больше.



Р и с . 2 Температурная зависимость предела текучести образцов закаленной чистой (1), закаленной микролегированной иттрием (2) и закаленной легированной палладием (3) меди

Упрочнение гранцентрированных металлов сразу после закалки объясняется стопорением дислокаций за счет образования на них ступенек и порогов, атмосфер Коттрелла в результате упругого взаимодействия с ними вакансий [7]. При наличии в меди примеси замещения – атомов иттрия пространство около атомов примеси становится энергетически выгодным для размещения вакансий, то есть в кристалле появляется большое число стоков вакансий. Такие области в материале были названы ловушками точечных дефектов, куда относятся, в частности, атомы примеси, при этом точечный дефект не теряет своей индивидуальности [8]. Наличие таких ловушек точечных дефектов увеличивает эффективную скорость их взаимной рекомбинации, что влияет, в нашем случае, на величину закалочного упрочнения микролегированной меди.

Так как основной причиной закалочного упрочнения является возникновение вторичных дефектов и адсорбция вакансий на дислокациях, то захват закалочных вакансий атомами иттрия приводит к снижению величины закалочного упрочнения в микролегированной меди по сравнению с медью МВЭ (табл. 2, рис. 3, кривая 2).



Р и с . 3 . Температурная зависимость прироста предела текучести закаленных образцов чистой (1) и микролегированной иттрием (2) меди и легированной палладием (3) меди

За упрочнение закаленных образцов микролегированной иттрием меди в условиях медленно возрастающей нагрузки при температурах 400 и 500 К ответственными становятся диффузионные механизмы образования новых центров закрепления дислокаций – различных видов вторичных дефектов.

Атомы палладия, размер которых намного меньше атомов иттрия ($R_a(Pd) = 0,138$ нм), являются примесью внедрения в меди и увеличение предела текучести исходных и закаленных образцов легированных палладием меди (кривая 3 рис. 1 и 2) в основном связано с закреплением дислокаций атомами внедрения. Наличие других дефектов оказывает значительно меньшее воздействие из-за малой энергии связи вакансий и атомов замещения с дислокациями (табл. 3).

Таблица 3

Энергия связи точечных дефектов с краевой дислокацией [9]

Точечный дефект	$E_{упр}$, эВ	$E_{электр}$, эВ	$E_{общ}$, эВ
Межузельный атом (примесный или собственный)	0,2–0,5	0,02	0,2–0,5
Атом замещения	0,05–0,1	0,02	0,05–0,1
Вакансия	0,02	0,02	0,04

Упругие поля напряжений дислокации и примесного атома взаимодействуют, и атомы палладия, растворенного по способу внедрения, притягиваются к области гидростатического растяжения и «осаждаются» вдоль края экстраплоскости краевой дислокации, что приводит к образованию атмосфер (облаков) Коттрелла и дополнительному закреплению дислокационных отрезков. При медленном движении дислокации облако перемещается вслед за дислокацией диффузионным образом. Отставание облака от дислокации приводит к появлению силы торможения.

Энергия связи краевой дислокации с точечными дефектами определяется не только упругим (коттреловским) взаимодействием. В нее вносит вклад также электрическое взаимодействие. Однако в металлах электрическое взаимодействие дислокации с примесными атомами значительно слабее, чем упругое (табл. 3.).

С повышением температуры атмосфера Коттрелла рассасывается. Концентрация примесных атомов, согласно формуле, $C_E = C_0 e^{\frac{E_{\max}}{kT}}$ [9], будет уменьшаться, что приводит к снижению прироста предела текучести закаленных образцов меди MB+Pd при $T = 400, 500$ К (кривая 3, рис. 3). Для образцов меди, микролегированной иттрием, этого не наблюдается вследствие того, что для протекания диффузионных процессов атомов замещения с большим атомным радиусом необходима большая энергия, а соответственно, и большая температура.

Выводы

1. Повышение предела текучести легированной палладием и иттрием меди по сравнению с чистой медью обусловлено упругим взаимодействием дислокаций с атомами примеси.

2. Наблюдаемое увеличение предела текучести закаленных образцов чистой и легированной меди происходит вследствие стопорения дислокаций за счет образования атмосфер Коттрелла в результате упругого взаимодействия дислокаций с атомами примеси и вакансиями.

3. Выявлено влияние добавок элементов со сравнимым (палладий), по отношению к меди, и большим (иттрий) атомным радиусом на эффекты закалочного упрочнения меди. Результаты исследований объясняются механизмами образования и перераспределения вакансионных и вакансионно-примесных комплексов и процессами взаимодействия с ними дислокаций:

а) снижение величины закалочного упрочнения у микролегированной иттрием меди по сравнению с чистой и легированной палладием меди свидетельствует о том, что иттрий является ловушкой закалочных вакансий.

б) наибольший прирост предела текучести закаленных образцов легированной палладием меди связан с тем, что энергия связи атомов внедрения с краевой дислокацией в несколько раз выше энергии связи вакансий и атомов замещения с краевой дислокацией.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зеленский, В.Ф. Радиационные дефекты и распухание металлов / В.Ф. Зеленский, И.М. Неклюдов, Т.П. Черняева // Киев: Наук. Думка, 1988. 296 с.
2. Неклюдов, И.М. Изменение структуры и свойств деформированной чистой и микролегированной иттрием меди при отжиге / И.М. Неклюдов, В.Н. Воеводин, С.В. Шевченко и др. // Металлы. 1998. № 3. С. 87-92.
3. Беленко, И.А. Влияние микролегирования меди иттрием на величину закалочного упрочнения / И.А. Беленко // Радиационная повреждаемость и работоспособность конструкционных материалов: Материалы докладов VII конференции стран СНГ. Белгород, 1997. С. 99-101.
4. Коттрелл, А.Х. Дислокации и пластическое течение в кристаллах / А.Х. Коттрелл // М.: Металургиздат, 1958. 160 с.
5. Cottrell A.H., Hunter S.C., Nabarro F.R. Electrical interaction of a dislocation and solute atom // Phil. Mag. – 1953. – Vol. 44. – P. 1064-1067.
6. Криштал, М.А. Влияние микролегирования на модуль упругости меди / М.А. Криштал, М.А. Выбойщик, Д.Л. Меерсон и др. // ФММ. 1986. Т. 62. Вып. 4. С. 808-814.
7. Дефекты в закаленных металлах. М.: Атомиздат, 1969. 317 с.
8. Бакай, А.С. Центры рекомбинации переменной полярности в кристаллах / А.С. Бакай, В.Ф. Зеленский, И.М. Неклюдов // ВАНТ. Сер. ФРП и РМ. 1986. Вып 1(38). С. 3-6.
9. Новиков, И.И. Дефекты кристаллической решетки металлов / И.И. Новиков // М.: Металлургия, 1968. 188 с.

INFLUENCE DOPED YTTRIUM AND PALLADIUM ON QUENCH HARDENING COPPER

N.V. Kamychantchenko¹⁾, I.A. Belenko¹⁾, I.M. Neklyudov²⁾

¹⁾*Belgorod State University*

²⁾*National Science Center Kharkov Institute of Physics & Technology*

Results of the experimental investigations of the influence of the radius alloyed doped on quench hardening copper are presented. In experiment were used sample pure copper (99,999 wt.%) and copper with doped. The Installed difference in value quench hardening sample copper with doped yttrium and palladium. This is explained by dependency of the processes of the interaction atom admixture with own defect of the crystalline lattice copper from value of the atomic radius alloyed element.