

## ЗАКАЛОЧНОЕ УПРОЧНЕНИЕ МЕДИ М1.

И.А.Беленко,  
Н.В.Камышанченко,  
И.М.Неклюдов  
(БГПУ)

Исследовано влияние закалки от высоких температур и последующего отжига на предел текучести и напряжение течения меди. Изучены температурная зависимость величины этих напряжений и влияние продолжительности отжига на упрочнение образцов.

Результаты исследований объясняются механизмами образования и перераспределения вакансионных и вакансионно-примесных комплексов и процессами их взаимодействия с дислокациями.

Исследования металлов с неравновесной концентрацией точечных дефектов представляют интерес как с точки зрения выяснения энергетических и конфигурационных характеристик последних, так и для направленного воздействия на физико-механические свойства самих материалов [1, 2]. Так как пластическая деформация кристаллических тел определяется в основном подвижностью дислокаций, исследование возможностей закрепления их в реальных кристаллах является важной проблемой современного материаловедения.

У чистых металлов из-за малой концентрации атомов примеси эффект упрочнения вследствие закрепления дислокаций точечными дефектами относительно мал. Направленное формирование дефектной структуры с целью повышения прочности чистых металлов осуществляется с помощью различных видов механико-термического воздействия [2]. Один из относительно простых и эффективных способов упрочнения чистых металлов заключается в достижении высоких концентраций вакансий в их объеме с помощью закалки от высоких температур в охлажденную среду [3]. В зависимости от условий закалки и последующего старения у металлов с различными параметрами кристаллической решетки и энергией дефектов упаковки в той или иной мере проявляются количественные и качественные аспекты закалочного упрочнения металлов.

Ниже приведены результаты исследований влияния закалки и последующего отжига на свойства меди.

Материалом для исследования служила медь М1 (99,9%). Вырезанные из слитка полосы прокатывали до толщины 0,8 мм, затем из них изготавливали фигурные образцы с размерами рабочей части 0,8x1,5x15 мм.

Образцы предварительно механически шлифовали алмазной пастой и электрополировали в электролите: 66%  $H_3PO_4$  (ортофосфорная кислота) + 34% дистиллированной воды. После этого образцы отжигали при  $800^\circ C$  в течение 30 мин в вакууме  $10^{-5}$  мм рт. ст.

С целью создания в образцах неравновесной концентрации вакан-

сний использовали метод скоростной закалки в специальной установке для закалки, позволяющей нагревать образец до 1000°С в вакууме или инертной среде и осуществлять закалку свободным падением в охлажденное до 0°С масло. Скорость закалки меди по оценке составляла ~10<sup>3</sup> °С/с.

Испытанию на растяжение подвергали три партии образцов: 1 - исходные, отожженные при 800° С в вакууме в течение 30 мин; 2 - закаленные от 1000° С; 3 - отожженные при 100° С в течение 1-120 мин после закалки.

Растяжение образцов производили на установке с постоянной скоростью деформации, примерно равной 2 мм/мин. По диаграммам растяжения определяли значения напряжений течения  $\sigma_s$ ,  $\sigma_{0,2}$ ,  $\sigma_1$ . Каждая из экспериментальных точек на рисунках и в таблице представляет усредненное значение испытаний 2-3 образцов.

Зависимость величины напряжений течения от температуры испытания и способа термической обработки

|                   | Напряжения течения, МПа |     |     |     |     |                |     |     |     |     |            |     |     |     |     |
|-------------------|-------------------------|-----|-----|-----|-----|----------------|-----|-----|-----|-----|------------|-----|-----|-----|-----|
|                   | $\sigma_s$              |     |     |     |     | $\sigma_{0,2}$ |     |     |     |     | $\sigma_1$ |     |     |     |     |
|                   | 77                      | 196 | 300 | 400 | 500 | 77             | 196 | 300 | 400 | 500 | 77         | 196 | 300 | 400 | 500 |
| Режим обработки   |                         |     |     |     |     |                |     |     |     |     |            |     |     |     |     |
| Исходный          | 38                      | 32  | 28  | 26  | 22  | 46             | 38  | 36  | 33  | 30  | 63         | 52  | 50  | 49  | 44  |
| Закалка от 1000°С | 92                      | 83  | 80  | 72  | 67  | 112            | 100 | 96  | 82  | 78  | 134        | 119 | 114 | 98  | 94  |

После закалки образцов меди от 1000°С в масло при 0°С оценивали концентрацию вакансий (С) с учетом скорости закалки по формуле:

$$C \approx \exp\left(-\frac{E}{kT}\right),$$

где E - энергия образования вакансий в меди, равная 1,27 эВ [4];

k - постоянная Больцмана, T - температура .

Она оказалась равной ~ 10<sup>-5</sup>.

Как видно из таблицы и рис. 1 и 2, закалка меди более чем в два раза повышает предел текучести во всем исследованном интервале температур.

Упрочнение гранцентрированных металлов сразу после закалки обусловлено стопорением дислокаций за счет образования на них ступенек и порогов, атмосфер Коттрелла в результате упругого взаимодействия с ними вакансий. При быстрой закалке меди с длительной выдержкой образцов после закалки даже при комнатной температуре из-

быточные вакансии объединяются в плоские и объемные вакансионные комплексы. Образование кластеров и дислокационных петель, микропустот при отжиге закаленной меди приводит к дополнительному увеличению предела текучести (рис.3).

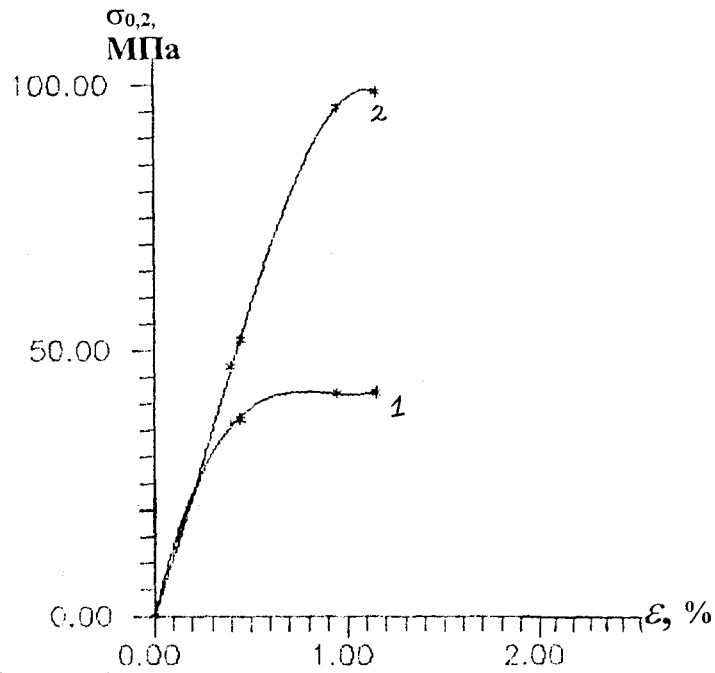


Рис. 1. Исходные участки диаграмм упрочнения исходных (1) и закаленных (2) образцов меди М1 при комнатной температуре

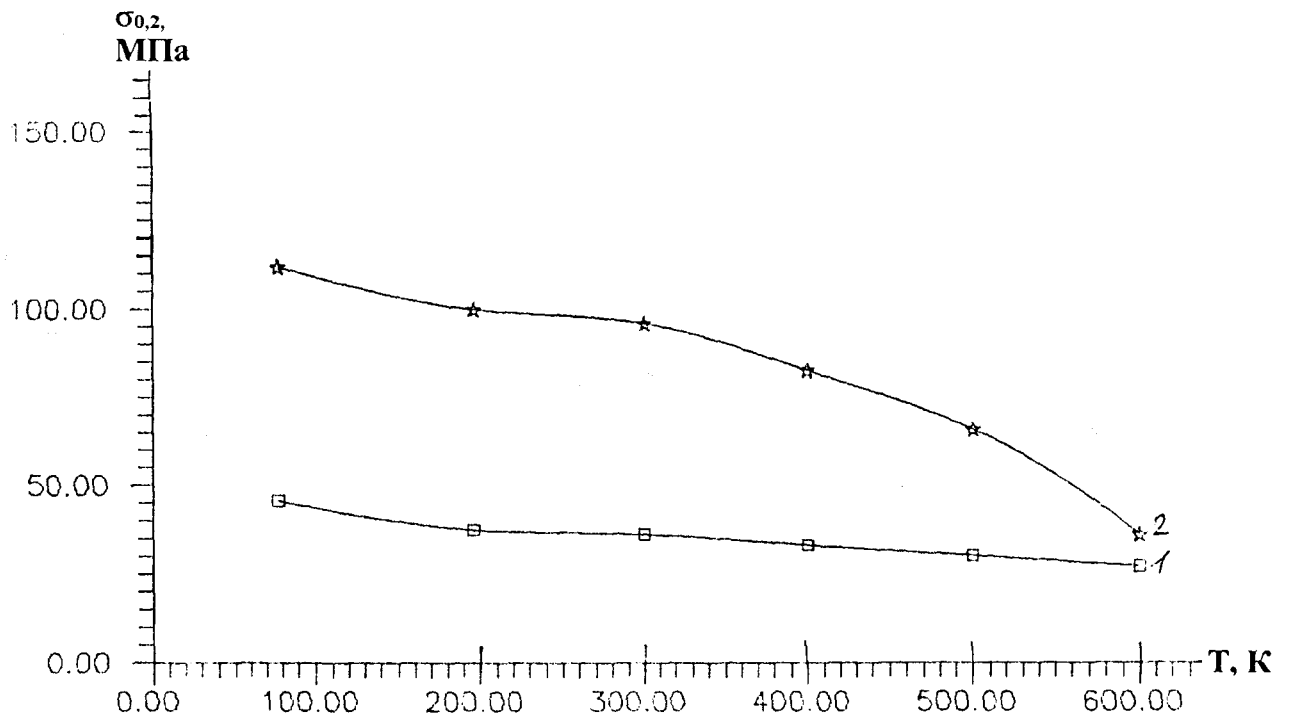


Рис. 2. Температурные зависимости предела текучести исходных (1) и закаленных (2) образцов меди М1.

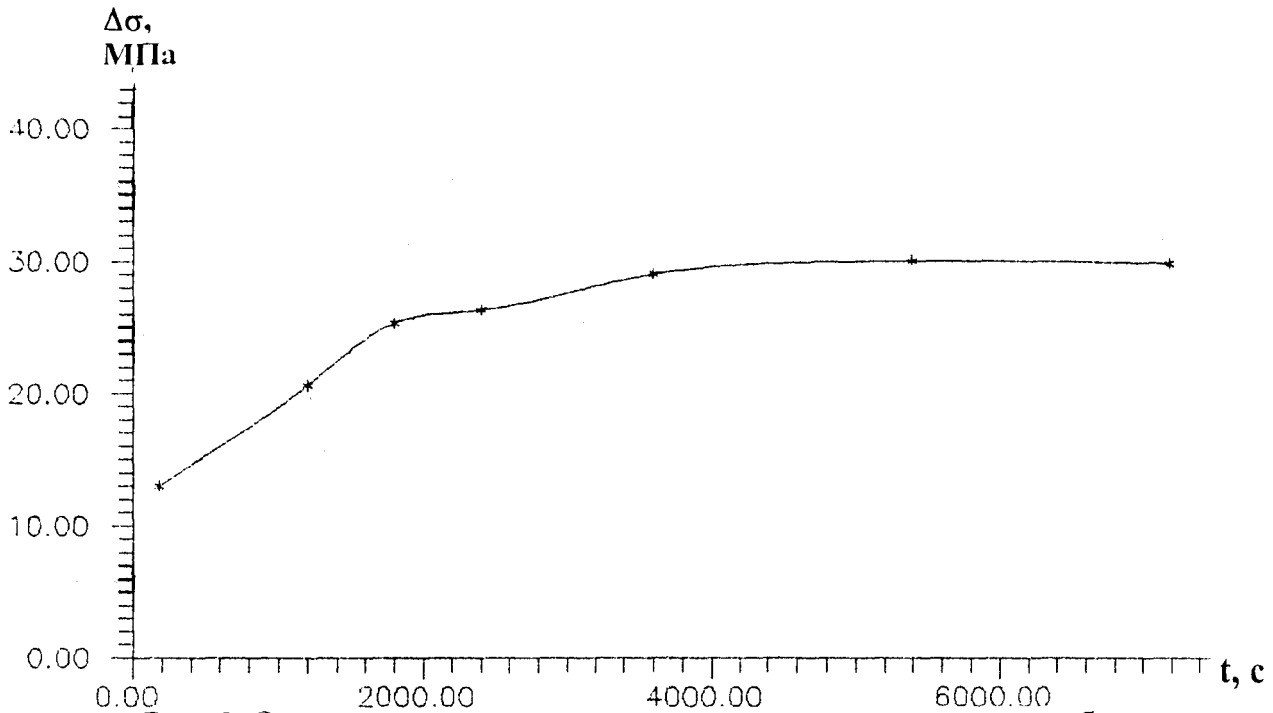


Рис. 3. Зависимость прироста предела текучести закаленных образцов меди М1 от продолжительности послезакалочного отжига при 100°C.

Как видно из рис.2, для отожженных образцов характерно практически линейное изменение предела текучести с увеличением температуры испытания. У закаленных образцов во всем температурном интервале предел текучести выше, чем у исходных. Только при 600 К их значения становятся практически одинаковыми. Разупрочнение закаленных образцов меди при повышении температуры можно объяснить усилением подвижности вакансий и распадом центров закрепления дислокаций и кластеров [5].

Свидетельством образования вторичных дефектов, закрепляющих дислокации, является изменение конфигурации дислокаций после отжига закаленной меди. Как видно из рис.4, у исходных образцов меди в основном наблюдаются линейные сегменты дислокаций (рис. 4, а). После закалки и отжига при 100°C в течение 15 мин образуется большое число кластеров (рис. 4, б).



Рис. 4. Электронномикроскопические снимки структуры меди М1 в исходном состоянии (а) и после закалки С 1000°C с последующим отжигом при 100°C в течении 15 мин (б) (x 80000)

Таким образом, для образцов меди М1 обнаружено значительное увеличение предела текучести в широком температурном интервале после скоростной закалки образцов от 1000°С в масло при 0°С. В отличие от исходных образцов выявлена более сложная температурная зависимость предела текучести для закаленных образцов в исследованном интервале температур. Упрочнение закаленной меди обуславливается в основном закреплением дислокаций и возникновением дополнительных барьеров для движущихся дислокаций в плоскостях скольжения.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Зеленский В.Ф., Неклюдов И.М., Черняева Т.П. Радиационные дефекты и распухание металлов. - Киев: Наукова Думка, 1988. - 294 с.
2. Паршин А.М., Неклюдов И.М., Гуляев Б.Б., Камышанченко Н.В., Пряхин Е.И. Структура и свойства сплавов. - М.: Металлургия, 1993. - 317 с.
3. Кимура Г., Маддин Р. Влияние закаленных вакансий на механические свойства металлов и сплавов//Дефекты в закаленных металлах.- М.: Атомиздат, 1969. - С.188-270.
4. Balluffi R.W. Vacancy defect mobilities and binding energies obtained from annealing studies.//J. Nucl. Mater. -1978 - vol.69-70 - N1-2. - P.240-263.
5. Камышанченко Н.В. Влияние механико-термического воздействия на структуру и свойства закаленных чистых металлов. - М.: Металлургия, 1984. -197 с.

#### ВЛИЯНИЕ ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ВЕЛИЧИНУ ПРЕДЕЛА ТЕКУЧЕСТИ СТАЛИ X18N10T

В.Н. Доценко,  
Н.В. Камышанченко,  
И.М. Неклюдов  
(БГПУ)

Исследовано влияние термоциклической обработки (ТЦО) образцов стали X18N10T на их предел текучести. Установлены зависимости прироста предела текучести стали от параметров термоциклирования (числа, периода, интервала), от температуры и времени отпуска. Полученные данные указывают на возможность повышения прочностных характеристик стали за счет термоциклирования.

В настоящее время в производстве коррозионностойких сталей одними из приоритетных остаются хромоникелевые стали типа 18-10. Особую роль в улучшении механических характеристик этих сталей играют различные виды термомеханических обработок, позволяющие получать стали с заданными свойствами для применения в соответ-