

УДК 538.93+669

Дубский Г.А., Нефедьев А.А., Долгушин Д.М., Мавринский В.В., Лебедев А.В.

## ВЛИЯНИЕ МИКРОЛЕГИРОВАНИЯ ЖЕЛЕЗОМ МЕДИ НА ТЕМПЕРАТУРУ РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИИ СПЛАВА

**Аннотация.** Рабочие стенки кристаллизаторов машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) изготавливают из меди с различными легирующими добавками. Использование меди обусловлено ее большой теплопроводностью, обеспечивающей быстрый отвод тепла от кристаллизующегося металла, а легирующие добавки уменьшают быстрый износ меди в процессе работы кристаллизатора. В данной работе исследуется медь, легированная железом различной концентрации. Получены экспериментальные зависимости термоэлектродвижущей силы, электрического сопротивления и твердости (НВ) от температуры при различных величинах пластической деформации. Показано, что при одной и той же величине деформации с увеличением концентрации железа растет твердость сплава и ее температура рекристаллизации. В качестве индикатора структурных изменений, происходящих в сплавах при термических способах обработки было проанализировано электросопротивление, которое, как известно, является структурно чувствительным свойством. Так анализ показал, что в меди пластически деформируемой до 50% и дополнительно легированной железом процесс восстановления удельного электрического сопротивления протекает медленней и при более высоких температурах, в сравнении с чистой медью. При этом полное восстановление остаточного электрического сопротивления наблюдается в диапазоне 350°C. В данном случае главными процессами отжига дефектов являются – рекристаллизация и возврат. В заключительной части работы сформулированы рекомендации для практического использования железомедных сплавов.

**Ключевые слова:** железомедный сплав, электротехническая медь, четырехэлектродный метод, термоэлектродвижущая сила, электрическое сопротивление, твердость, температура рекристаллизации

Наряду с теплофизическими свойствами железомедных сплавов для их использования в качестве первых стенок кристаллизаторов МНЛЗ, важной характеристикой, определяющей работоспособность данных стенок, является температура начала их рекристаллизации.

Рекристаллизация – это процесс образования новых зерен при нагреве наклепанного металла до определенной температуры (температуры начала рекристаллизации). Рекристаллизация – самый распространенный из процессов, формирующих структуру металлов и сплавов, а тем самым и структурно чувствительные механические и физические свойства и их анизотропию.

Существует несколько видов рекристаллизации, отличающихся типом движущих сил, вызывающих миграцию границ зерен. Традиционно выделяют следующие виды рекристаллизации [1-5]:

- первичная рекристаллизация;
- собирательная рекристаллизация;
- вторичная рекристаллизация.

В отличие от температуры фазового равновесия температура начала рекристаллизации не является физической постоянной для металла или сплава. Она зависит не только от химического состава, но и от продолжительности отжига, степени деформации, исходной структуры и ряда других внутренних и внешних факторов [2, 6].

Поскольку температура начала рекристаллизации является показателем способности металла или сплава противостоять тепловым воздействиям, желательно исследовать влияние малых концентраций легирующих добавок на эту температуру. Считается,

что в интервале малых концентраций добавки почти всегда повышают температуру начала кристаллизации, причем с увеличением их температуры рекристаллизации возрастает с дальнейшим затуханием. Однако для медных сплавов это не всегда так [6].

Для детального исследования процессов рекристаллизации подготовленные образцы из микролегирующей железом меди подвергали пластической деформации до заданной величины, а затем отжигали. При отжиге измеряли:

- 1) дифференциальную термоэлектродвижущую силу ( $dE/dT$ );
- 2) относительное изменение сопротивления ( $\Delta R/R_0$ ) четырехэлектродным методом;
- 3) твердость по Бриннелю (НВ).

При пластическом деформировании или быстром охлаждении нагретого до высокой температуры металла внешние или внутренние силовые напряжения совершают работу, одна часть которой идет на увеличение энергии дислокаций (имеющихся и вновь рождающихся), другая рассеивается, превращаясь в конечном счете в тепло, а третья расходуется на образование в пластически или термически деформируемом металле структурных дефектов и новых фаз, понижая или увеличивая его внутреннюю энергию. Это приводит к порче кристаллической структуры деформированных металлов из-за:

- 1) значительного увеличения плотности дислокаций;
- 2) их скопления на различного рода препятствиях;
- 3) увеличения концентрации точечных дефектов, образующихся на шлейфах движущихся дислокаций и на вновь образующихся границах субзерен исходного поликристалла;
- 4) возникновения микропор и микротрещин.

Все эти изменения кристаллической структуры приводят к так называемому «наклепу» (или упрочнению), который связан с повышением его сопротивления дальнейшим пластическим сдвигам, появлению хрупкости, ломкости и т.д. Очевидно, что пластически деформируемый металл находится в неравновесном возбужденном состоянии – чем выше это возбуждение, тем больше «наклеп». Это состояние металла или сплава после снятия внешних энергетических воздействий остается метастабильным. Единственным способом избавления от структурного возбуждения является нагрев, то есть повышение температуры в заданном режиме до определенной величины с последующим медленным охлаждением.

При пластической деформации происходят структурные изменения ионного остова, а значит, и легкой, быстро адаптирующейся подсистемы – электронной плотности состояний, что обязательно приводит к изменению многих физических свойств, например электрического сопротивления, термоэлектродвижущей силы (ТЭДС), намагниченности и др.

Проведя эксперименты, мы установили, что при увеличении степени пластической деформации в изотермических условиях величина электрического сопротивления растет. А если отжечь предварительно пластически деформированный до определенной величины металл, то его сопротивление падает до величины, соответствующей нормализованному металлу. Начало и конец падения электрического сопротивления точно даст температуру наибольшей скорости отжига накопленных при пластическом деформировании структурных дефектов (температуру рекристаллизации), так как их количество, распределение и вид в основном определяют величину изменения электрического сопротивления  $\Delta R$ , то есть  $\Delta R \approx f(\Delta n_g)$ . Кроме того, величина степени пластической деформации измеряется ТЭДС, которая очень чувствительна к изменению электронной плотности состояний электронной фазы.

Результаты проведенных исследований зависимости  $\Delta R/R_0$ , НВ и  $dE/dT$  электротехнической меди от температуры при заданной величине степени пластической деформации приведены на рис. 1-3.

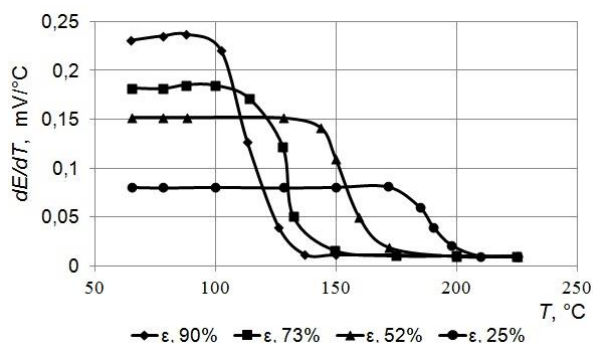


Рис. 1. Влияние степени деформации при протяжке электротехнической меди на величину  $(dE/dT)$  – дифференциальная ТЭДС

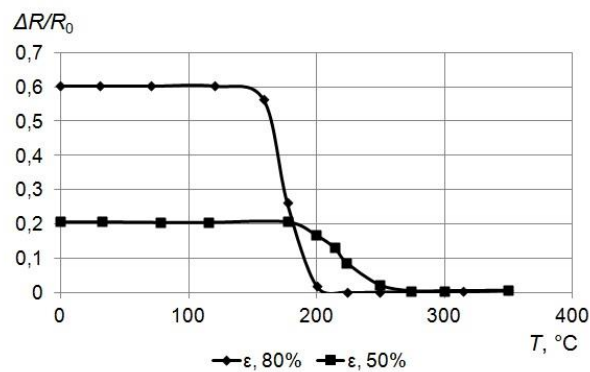


Рис. 2. Изменение относительного электрического сопротивления медной проволоки от температуры при разной величине пластической деформации

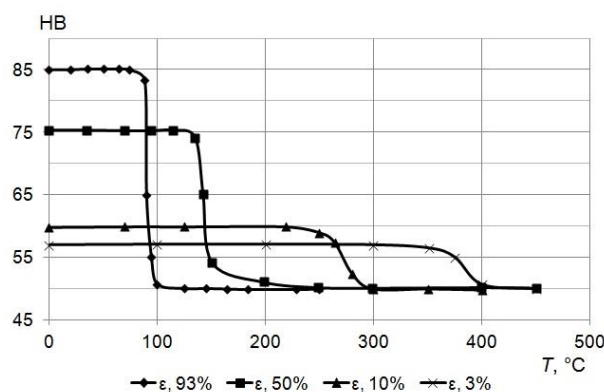


Рис. 3. Изменение твердости упрочненной электролитической меди при отжиге

При рассмотрении изменения сопротивления [7] видно, что при изотермическом увеличении степени пластической деформации величина  $\Delta R/R_0$  растет до насыщения, а при отжиге упрочненного металла в некотором температурном интервале не меняется, потом монотонно падает от  $T_n$  (температура начала сброса) до  $T_k$  (температура конца сброса) и после  $T_k$  выходит на значение, соответствующее нормализованному (отожженному) металлу.

На рис. 3 приведена зависимость твердости (по Бриннелю) от температуры медных образцов, предварительно пластически деформированных до определенной величины.

Поведение твердости (НВ) при изменении температуры аналогично поведению  $\Delta R/R_0$  и  $dE/dT$  от  $T$ . Поскольку величина НВ от  $T$  определяется структурой и фазовым состоянием исследуемого образца, то поведение  $\Delta R/R_0$  и  $dE/dT$  от  $T$  обусловлено изменением электронной плотности состояния за счет изменения структуры и фазового состояния. Таким образом, напряженно-деформированное состояние (наклеп) может быть снято нагреванием наклепанного образца с последующим медленным охлаждением.

Температурный интервал начала и конца сброса напряжений определяется из температурных зависимостей  $\Delta R/R_0$  и  $dE/dT$  от  $T$  и НВ. Воспользовавшись экспериментальной зависимостью НВ от  $T$ , приведенной на рис. 3, построили график зависимости температуры отжига  $T_m$  (температуры конца рекристаллизации), соответствующей наибольшей скорости сброса наклепа, от деформации (рис. 4). Из рисунка видно, что чем меньше величина пластической деформации, тем выше температура процесса снятия напряженного состояния (наклепа). Это может быть объяснено изменением скрытой энергии поглощения при пластической деформации.

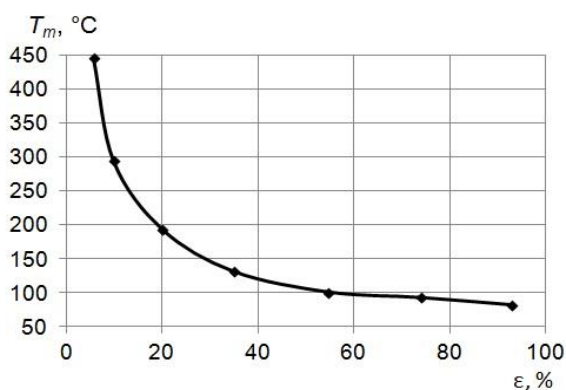


Рис. 4. Зависимость температуры отжига, соответствующей наибольшему сбросу наклепа от степени пластической деформации (температуры конца рекристаллизации)

Также исследования были проведены для образцов меди, микролегированной железом. Исследованные образцы меди содержали 0,097, 0,17, 0,28 и 0,3% Fe. Зависимости твердости этих образцов от величины обжатия приведены на рис. 5.

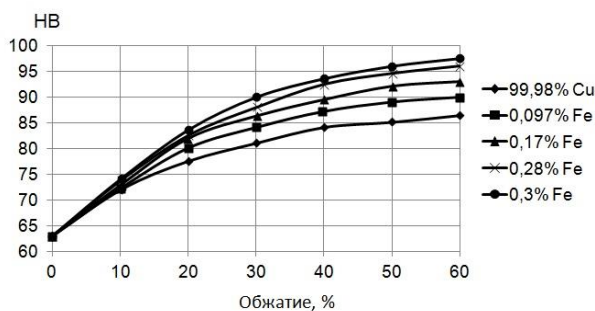


Рис. 5. Зависимость твердости медных образцов от величины обжатия с различным содержанием железа

Из графика рис. 5 видно, что при одной и той же величине обжатия твердость возрастает с увеличением концентрации железа в сплаве. Если предположить, что концентрация дислокаций при заданной величине обжатия и разной концентрации железа одинакова, то увеличение твердости может быть связано

с возрастанием числа стопоров дислокаций, образующихся за счет введения примеси. Их тем больше, чем больше концентрация легирующей добавки.

В последующем каждый образец с заданной концентрацией железа в меди и величиной обжатия подвергался ступенчатому режиму отжига с одновременным замером изменяющейся температуры отжига от твердости. Было получено четыре серии кривых, отражающих зависимости твердости от температуры отжига для каждой концентрации железа в меди. Одна из таких серий приведена на рис. 6.

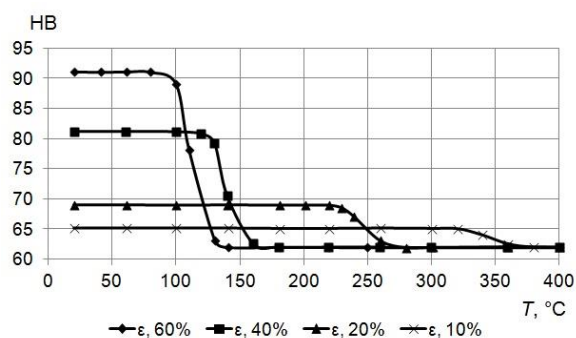


Рис. 6. Зависимость твердости от температуры отжига для Cu с 0,17% Fe для разных величин обжатия

По результатам проведенных исследований построены зависимости температуры отжига (рекристаллизации) от величины обжатия для разных концентраций железа в меди. Графики этих зависимостей изображены на рис. 7.

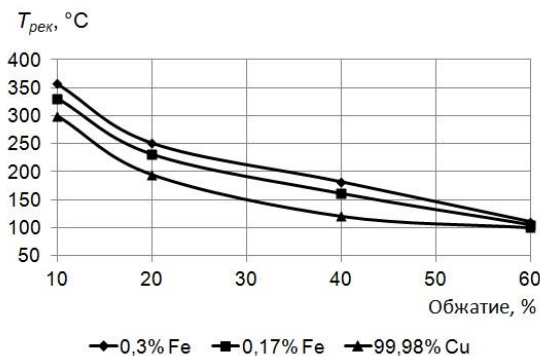


Рис. 7. Зависимость температуры рекристаллизации от величины обжатия образцов Cu с различным процентным содержанием железа

Анализ этих зависимостей показывает, что увеличение микролегирующей добавки железа в меди повышает ее температуру рекристаллизации.

Общее увеличение температуры рекристаллизации  $\Delta T_{рек}$  в пределах растворимости железа в меди ( $0 < c \leq 0,3\% \text{ Fe}$ ) составляет примерно  $70^\circ\text{C}$ .

Кроме этого, из проведенного комплекса исследований железомедных сплавов и результатов, которые они дали, можно предложить несколько рекомендаций для их практической реализации:

1. Наиболее подходящими микролегированными сплавами железо-медь для изготовления стенок кристаллизаторов являются сплавы с концентрацией железа в меди в пределах  $0,17 < c \leq 0,25\%$ .

2. Прежде чем заготовку для изготовления стенок кристаллизатора пускать в работу, ее необходимо подвергать механической обработке, например обработке роликом с величиной обжатия порядка 10–15%, что повысит их твердость, износостойкость и жаропрочность на 25–30%.

#### Список источников

1. Изучение процессов рекристаллизации при отжиге сильнодеформированных мелкозернистых металлов: практикум / А.В. Нохрин, Ю.Г. Лопатин, А.В. Пискунов, В.Н. Чувильдеев, Е.С. Смирнова. Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2016. 31 с.
2. Горелик С.С., Добаткин С.В., Капуткина Л.М. Рекристаллизация металлов и сплавов. М.: МИСиС, 2005. 432 с.
3. Кан Р.У. Возврат и рекристаллизация // Физическое металловедение: в 3 т. / под ред. Р. Кан, П. Хаазена. М.: Металлургия, 1987. Т. 2. С. 434-508.
4. Рекристаллизация металлических материалов / под ред. Ф. Хеснера, М.: Металлургия, 1982. 352 с.
5. Перевезенцев В. Н., Щербань М. Ю. Рекристаллизация металлов и сплавов: учебное пособие. Н. Новгород: ННГУ, 2000. 62 с.
6. Новиков И.И. Теория термической обработки металлов. М.: Металлургия, 1986. 480 с.
7. Экспериментальная установка для исследования теплофизических свойств твердых тел методом периодических тепловых волн / Дубский Г.А., Вдовин К.Н., Нефедьев А.А., Дубская Т.Я. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. 2007. №4. С. 81–88.

#### Сведения об авторах

**Дубский Геннадий Алексеевич** – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: physics@magtu.ru

**Нефедьев Александр Алексеевич** – кандидат технических наук, ст. преподаватель кафедры физики ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: shuric\_xp@mail.ru

**Долгушин Денис Михайлович** – кандидат физико-математических наук, заведующий кафедрой физики ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: dolgushin@mail.ru

**Мавринский Виктор Викторович** – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: v.mavrinsky@magtu.ru

**Лебедев Алексей Викторович** – аспирант кафедры физики ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия.

---

#### INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

---

#### INFLUENCE OF COPPER MICROALLOYING WITH IRON ON ALLOY RECRYSTALLIZATION TEMPERATURE

**Gennady A. Dubsky** – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Physics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: physics@magtu.ru

**Alexander A. Nefediev** – Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer of the Department of Physics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: shuric\_xp@mail.ru

**Denis M. Dolgushin** – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Head of the Department of Physics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: dolgushin@mail.ru

**Viktor V. Mavrinsky** – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Physics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: v.mavrinsky@magtu.ru

**Alexey V. Lebedev** – postgraduate student of the Department of Physics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

**Annotation.** Working walls of crystallizers of continuous casting machines (CCM) are made of copper with various alloying additives. The use of copper is due to its high thermal conductivity, which provides rapid heat removal from the crystallizing metal, and alloying additives reduce the rapid wear of copper in the process of crystallizer operation. In this paper copper alloyed with iron of different concentrations is investigated. Experimental dependences of thermoelectromotive force, electrical resistivity and hardness (HB) on temperature at different magnitudes of plastic deformation are obtained. It is shown that at the same magnitude of deformation with increasing iron concentration the hardness of the alloy and its recrystallization temperature increases. As an indicator of structural changes occurring in alloys during thermal treatment methods was analyzed electrical resistance, which is known to be a structurally sensitive property. So the analysis showed that in copper plastic deformed up to 50% and additionally alloyed with iron the process of restoration of electrical resistivity proceeds more slowly and at higher temperatures, compared to pure copper. At the same time, complete recovery of residual electrical resistivity is observed in the range of 350°C. In this case, the main processes of annealing defects are recrystallization and return. In the final part of the work recommendations for the practical use of iron-copper alloys are formulated.

**Keywords:** iron-copper alloy, electrical copper, four-electrode method, thermoelectromotive force, electrical resistance, hardness, recrystallization temperature.

---

Ссылка на статью:

Влияние микролегирования железом меди на температуру рекристаллизации сплава / Дубский Г.А., Нефедьев А.А., Долгушин Д.М., Мавринский В.В., Лебедев А.В.// Теория и технология металлургического производства. 2024. №3(50). С. 9-13.  
Dubskiy G.A., Nefediev A.A., Dolgushin D.M., Mavrinsky V.V., Lebedev A.V. Influence of copper microalloying with iron on alloy recrystallization temperature. *Teoria i tehnologia metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2024, vol. 50, no. 3, pp. 9–13.