УДК 669.3.017

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ МЕДНЫХ СПЛАВОВ

Козик Е.С., Хрущов М.М., Бакшаев И.С., Горшков Н.М., Васильев П.А., Рожнов Н.С., Чибиров Т.Д.

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Российская Федерация,
MihailKhrushchov@yandex.ru

Аннотация: работа посвящена оптимизации режимов термической обработки хромоциркониевой бронзы БрХЦр. Рассмотрено влияние температуры закалки и старения на фазовый состав, микроструктуру и свойства сплавов системы Cu-Cr-Zr. На основе литературных данных и термодинамического моделирования предложены границы оптимальных режимов: закалка 950–1000 °C, старение 450–500 °C. Установлено, что отклонение от режима приводит либо к неполному распаду пересыщенного твёрдого раствора, либо к коагуляции выделению и росту зерна. Работа может служить основой для модели прогнозирования свойств БрХЦр после термообработки.

Ключевые слова: БрХЦр, Cu-Cr-Zr, закалка, старение, дисперсионное твердение, электропроводность, микротвёрдость.

I. ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы обусловлена тем, что хромоциркониевая бронза (C18150) находит применение в электротехнических компонентах, включая элементы, проектируемые и изготавливаемые в рамках современных EDA-ориентированных производственных цепочек. Моделирование термической обработки таких материалов представляет интерес для TCAD-подхода (Technology Computer-Aided Design, компьютерное проектирование в электронике) – направления EDA (Electronic Design Automation, автоматизация проектирования электронных приборов и устройств), связанного с моделированием технологических процессов.

Хромоциркониевая бронза БрХЦр – основной материал для ответственных деталей ракетных двигателей, кристаллизаторов непрерывного литья стали и электродов контактной сварки. Уникальное сочетание прочности и электропроводности достигается дисперсионным твердением: закалка фиксирует пересыщенный твёрдый раствор Cr и Zr в меди, а старение вызывает его распад с выделением мелкодисперсных частиц. БрХЦр относится к группе бронз, которые, в отличие от латуней, обладают высокими механическими и антифрикционными свойствами, хорошо сопротивляются коррозии и имеют высокую электропроводность [6]. Легирование меди хромом (до 0,5 %) повышает прочность, пластичность и электропроводность; введение циркония способствует измельчению структуры [6].

Режимы термообработки в рассмотренном материале различаются: в [1] оптимальными названы закалка при 1000 °C в течение одного часа с охлаждением в воде и старение при 470 °C в течение пяти часов; в патенте [4] – предлагается закалка, начиная с 800 °C и двухступенчатое старение при температурах 480–500 °C и 540–550 °C. Уместно создать единую модель влияния температуры на фазовый состав и свойства, поэтому цель работы – систематизация данных и определение границ оптимальных режимов термообработки.

II. МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

а. Объект исследования

В рассмотренных статьях описываются составы классического типа (~0,5-1 % Cr, 0,1-0,3 % Zr) и близкие к ним, например, Cu-0,3 % Cr-0,5 % Zr [3]. Анализ основан на литературных данных [1-3], термодинамическом моделировании фазового состава, результатах измерения микротвёрдости (HV, 100 г, 15 с) и электропроводности вихретоковый метод из [3].

б. Методика расчёта

Методика расчёта построена на зависимости фазового состава от температуры. Температура полного растворения фаз Cr и Zr принимается за нижнюю границу закалки; температуры начала выделения Cr и Cu_5Zr – за ориентир для старения.

Закалка сплавов без полиморфного превращения направлена на возможно более полное растворение избыточных фаз; с ростом концентрации легирующего элемента в твёрдом растворе его прочность возрастает, поэтому пересыщенный раствор прочнее отожжённого [5, с. 196–197]. Верхняя граница закалки определена опасностью пережога и оплавления границ зёрен [5, с. 197–198]. Для оценки

упрочнения использован метод Виккерса (HV), применяемый для тонких слоёв и отдельных структурных составляющих [6, с. 97].

III. РЕЗУЛЬТАТЫ, СРАВНЕНИЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

а. Фазовый состав и температура закалки

Согласно термодинамическому моделированию, полное растворение фаз хрома и циркония в меди достигается при температурах выше 950 °C, что согласуется с литературными данными: в [1] оптимальной названа закалка при 1000 °C; в [3] использована закалка при 920 °C. С другой стороны, в [2] показано, что активный рост зерна в хромовой бронзе начинается выше 800 °C, а при 900 °C в структуре появляются частицы Cu_5Zr. Таким образом, на основе экспериментальных данных, температура закалки дополнительно ограничена сверху развитием собирательной рекристаллизации.

Таблица 1. Влияние температуры отжига на твёрдость и электропроводность ультрамелкозернистого сплава Cu–0,3 % Cr–0,5 % Zr [3]

Annealing temperature, °C	ST+ECAP		ST+AT+ECAP	
	Vickers hardness, HV	Electrical conductivity, % IACS	Vickers hardness, HV	Electrical conductivity, % IACS
300	195,3	69,5	152,9	76,8
350	194,4	73,0	152,4	76,8
400	188,3	75,8	149,6	78,0
450	184,3	76,0	146,4	79,5
500	173,6	75,4	155,4	79,1
550	149,0	72,9	148,7	74,9
600	125,0	70,4	122,7	72,4
650	111,3	69,5	81,8	69,4
700	84,6	66,1	72,1	64,2

ECAP – Equal-Channel Angular Pressing (равноканальное угловое прессование)

При старении распад пересыщенного раствора повышает прочность и электропроводность [5, с. 200-201]; низкие температуры не дают полного распада, высокие — вызывают коагуляцию.

б. Старение и свойства

По данным [3] для состава Cu-0,3 % Cr-0,5 % Zr максимальные значения микротвёрдости и электропроводности достигаются в интервале 450–500 °C. При 500 °C микротвёрдость составляет ~155 HV. При повышении температуры до 600 °C и выше наблюдается резкое разупрочнение (HV падает до 122,7 при 600 °C и до 72,1 при 700 °C) и снижение электропроводности, что связано с коагуляцией выделений Cu_5Zr.

Таблица 2. Физико-механические свойства классических и экспериментальных бронз [1]

Материал	$\sigma_в$,МПа	НВ	δ,%	$T_{нач.рек.}$, °C	$\rho \cdot 10^{-8}$, Ом·м
БрХ (базовая)	440	125	30	400	2,33
БрХЦр (базовая)	460	145	37	450	2,18
БрХ (экспериментальная)	460	155	25	500	2,08
БрХЦр (экспериментальная)	490	170	27	550	1,98

В [1] для БрХЦр указаны: предел прочности $\sigma_в$ = 490 МПа, НВ = 170, относительное удлинение δ = 27 %, Т начала рекристаллизации = 550 °C, удельное электросопротивление $\rho = 1{,}98 \cdot 10^{-8}$ Ом·м. Это несколько выше, чем в [3], что, однако, объясняется наличием в составе рассматриваемой бронзы модифицирующих лигатур.

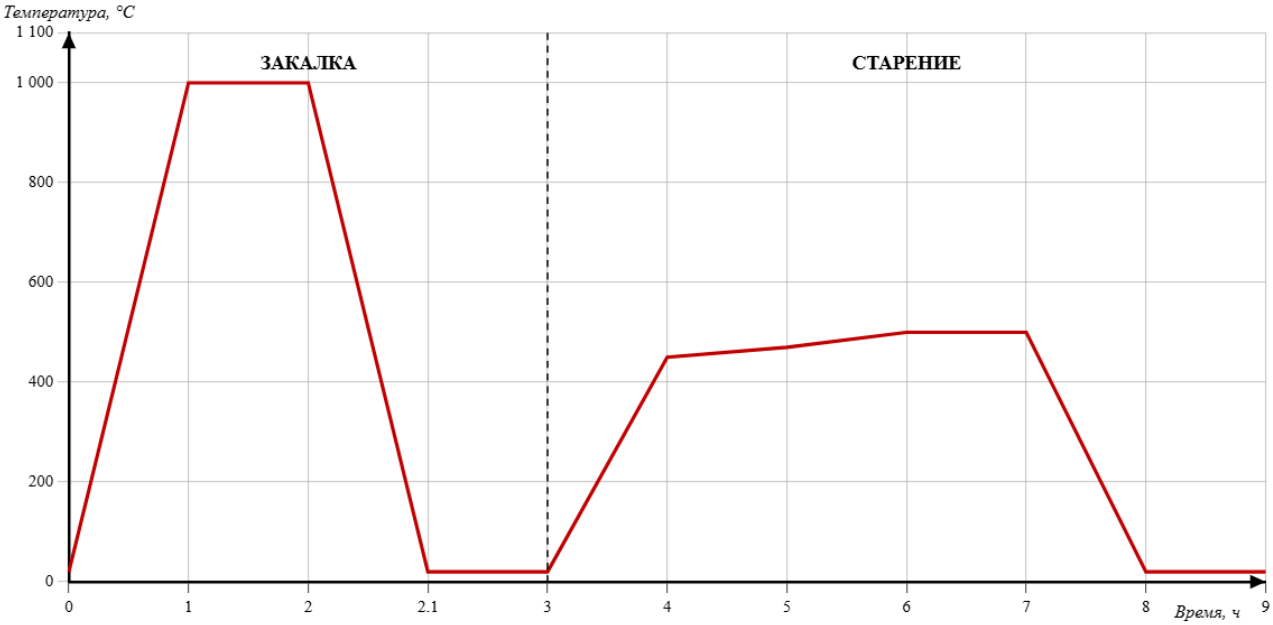


Рисунок 1. Схема температурно-временных интервалов обработки сплавов БрХЦр

в. Сравнение с моделированием

Расчётная температура полного растворения (выше 950 °C) и экспериментальные данные оптимального процесса старения (450-500 °C) согласуются с литературными режимами. Отклонение вниз по температуре закалки ниже 900 °C не обеспечивает полного пересыщения раствора, что снижает эффект старения; отклонение вверх более 1000 °C приводит к росту зерна. При старении ниже 450 °C распад неполный, выше 500 °C – начинается коагуляция.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённый анализ литературных данных и результатов термодинамического моделирования показал, что оптимальный интервал температур закалки БрХЦр составляет 950-1000 °C, а температур старения – 450-500 °C. Отклонение от этих интервалов приводит к ухудшению комплекса свойств: при закалке ниже 900 °C не достигается полное пересыщение твёрдого раствора, что снижает эффект последующего старения, тогда как нагрев выше 1000 °C вызывает рост зерна и снижение механических характеристик. При старении ниже 450 °C распад пересыщенного раствора остаётся неполным, а выше 500 °C начинается коагуляция выделений, сопровождающаяся падением микротвёрдости и электропроводности. На основании рассмотренных данных разработана феноменологическая модель термической обработки БрХЦр, описывающая три стадии: закалку старение и коагуляцию. Модель предсказывает оптимальный интервал температур: закалка 950-1000 °C, старение 450-500 °C. Полученные границы согласуются с независимыми экспериментальными данными. Модель может быть использована как составная часть TCAD-подхода при проектировании технологических маршрутов изготовления компонентов из БрХЦр для электронной промышленности.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Ловшенко Ф. Г., Ловшенко Г. Ф., Лозиков И. А. Получение, структура и свойства хромовых бронз, легированных механически сплавленными нанокристаллическими модифицирующими лигатурами / Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко, И. А. Лозиков // Литьё и металлургия. – 2016. – № 2 (83). – С. 69-79.

[2] Effect of nickel on structure of Cu-Cr-Zr bronze after annealing at 800 and 900 °C / Yu. V. Khudorozhkova, S. V. Burov, Yu. S. Korobov, M. S. Devyatyarov // Modern materials and technologies. – 2013. – No. 1. – P. 117-120.

[3] Bodyakova A. I., Lamzina N. A., Botshanov D. S., Lugovskaya A. S., Pilipenko A. G. Effect of treatment on thermal stability of Cu-Cr-Zr alloy / A. I. Bodyakova [et al.] // Synthesis, structure, and properties of high-entropy materials : materials of the international conference. – Belgorod : Belgorod State University, 2020. – P. 45. – URL: https://shea.bsuedu.ru/_files/2021-tez-en.pdf (дата обращения: 02.09.2026).

[4] Патент № 2239670 Российская Федерация, МПК C22C 9/00 (2006.01). Сплав на основе меди : № 2003101234/02 : заявл. 15.01.2003 : опубл. 10.11.2004 / заявитель Институт металлургии УрО РАН. – 4 с. : ил.

[5] Новиков И. И. Теория термической обработки металлов : учебник для вузов / И. И. Новиков. – 4-е изд., испр. и доп. – Москва : Металлургия, 1986. – 480 с.

[6] Лахтин Ю. М. Материаловедение : учебник для машиностроительных вузов / Ю. М. Лахтин, В. П. Леонтьева. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва : Машиностроение, 1990. – 528 с. : ил. – ISBN 5-217-00858-X.

SIMULATION OF THERMAL TREATMENT OF COPPER ALLOYS

E. Kozik, M. Khrushchov, I. Bakshaev, N. Gorshkov, P. Vasiliev, N. Rozhnov, T. Chibirov

MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russian Federation,
MihailKhrushchov@yandex.ru

Abstract: the work is devoted to optimization of heat treatment regimes for Cu–Cr–Zr bronze (BrKhTsr). The influence of quenching and aging temperatures on phase composition, microstructure and mechanical properties is considered. Based on literature analysis and thermodynamic modeling, optimal ranges are proposed: quenching at 950–1000 °C, aging at 450–500 °C. Deviation from these ranges leads either to incomplete decomposition of the supersaturated solid solution or to coagulation of precipitates and grain growth. The work can serve as a basis for a model predicting properties of BrKhTsr after heat treatment.

Keywords: BrKhCrZr, Cu–Cr–Zr, quenching, aging, dispersion hardening, electrical conductivity, microhardness.