

УДК 621.785.616.1

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ БЕРИЛЛИЕВОЙ БРОНЗЫ ПОСЛЕ ЗАКАЛКИ В АЗОТЕ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

Дария Петровна Слепцова⁽¹⁾, Вай Ян Мин Хтет⁽²⁾

Студент 4 курса⁽¹⁾, магистр 2 года⁽²⁾

кафедра «Материаловедение»

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Научные руководители: С.Ю. Шевченко, А.Е. Смирнов,

кандидаты технических наук, доценты кафедры «Материаловедение»

Ключевые слова: бериллиевая бронза (beryllium bronze), закалка (quenching).

Аннотация: Газовая закалка имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционной закалкой в воде, и потому является перспективным методом обработки полуфабрикатов из бериллиевой бронзы. Проведены исследования микроструктуры и микротвердости образцов из сплава БрБ2 после различных режимов термической обработки; выполнено моделирование процесса газовой закалки образцов с разными геометрическими размерами. Результаты экспериментов подтверждают, что с помощью закалки бериллиевых бронз в азоте высокого давления можно получить структуру и свойства, сопоставимые с результатами традиционной закалки в воде.

Бериллиевые бронзы обладают высокой износостойкостью и сопротивлением усталостному разрушению, длительное время сохраняют высокую прочность и упругие свойства. Эти ценные качества способствуют широкому применению бериллиевых сплавов в промышленности.

Большинство изделий из бериллиевых бронз изготавливают способом холодной пластической деформации. Для проведения любых операций, связанных с пластической деформацией - ковка, штамповка, прокатка, волочение и т.д., требуется закалка исходных заготовок. В закаленном состоянии эти сплавы обладают высокой технологической пластичностью, т.е. свойством подвергаться деформации без разрушения, что позволяет получать сложные детали, например, штамповкой с глубокой вытяжкой. Именно поэтому разработка новых технологий закалки бериллиевых бронз является актуальной задачей для исследований.

Газовая закалка имеет ряд преимуществ по сравнению с закалкой в воде: снижение деформаций деталей, возможность регулирования интенсивности закалки путем контроля давления и скорости газа, гибкость процесса, экологическая чистота производства, интеграция в производственные линии, воспроизводимые результаты закалки, чистые и сухие детали, и, как следствие, отсутствие необходимости промывки, простота управления процессом.

Целью данной работы является выбор оптимального режима закалки ленты из БрБ2 в азоте высокого давления. Для достижения цели поставлены и решены следующие задачи: сравнение значений микротвердости и исследование микроструктуры образцов из сплава БрБ2 после традиционной закалки в воде и закалки в газе, а также после старения образцов, моделирование процесса охлаждения при газовой закалке образцов различной геометрической формы.

Образцы для исследования представляли собой ленты различной толщины из бериллиевой бронзы марки БрБ2. Химический состав приведен в таблице 1.

Таблица 1. Химический состав БрБ2 по ГОСТ 18175-77

Cu, %	Be, %	Ni, %	Si, %	Al, %	Pb, %	Fe, %
96,9...98	1,8...2,1	0,2...0,5	$\leq 0,15$	$\leq 0,15$	$\leq 0,005$	$\leq 0,15$

1). Для закалки в вакуумной печи лента из бериллиевой бронзы была свернута в рулоны (рис.

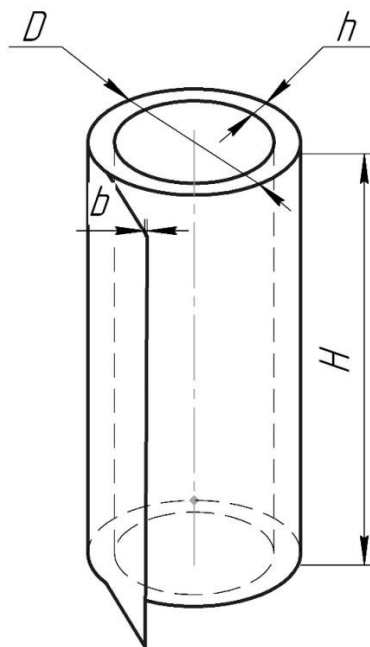


Рис. 1. Эскиз рулона из БрБ2

Геометрические размеры образцов приведены в таблице 2.

Таблица 2. Геометрические размеры исследуемых образцов

Номер образца	Высота рулона H, мм	Диаметр рулона D, мм	Толщина рулона h, мм	Толщина ленты, b, мм
1	120	360	14	0,5
2	120	370	15	0,5
3	200	280	9	0,1
4	200	280	10	0,1
5	200	200	13	0,05

Термическая обработка образцов состоит из закалки с последующим старением. Для сравнения результатов проведена закалка и в газе, и в воде.

Газовую закалку проводили в вакуумной печи 10.0VPT - 4020/24, температура нагрева составляла 785°C, выдержка 30 минут. Охлаждающая среда – азот при давлении 7,3 атм.

Нагрев под закалку образцов в воде проводили в печи СНОЛ-1,6.2,5.1/9 - И5 до температуры 770 °С с выдержкой 15 минут. Старение проводили в той же печи при температуре 340 °С, выдержка 1,5 часа.

Исследование микроструктуры образцов проведено с помощью микроскопа Olympus GX 51. Микроструктуры образцов приведены на рисунках 2,3 и 4.

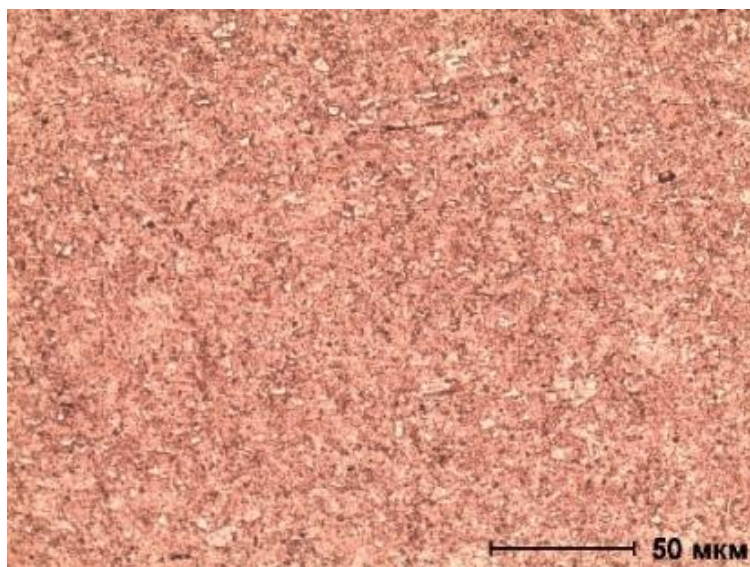


Рис. 2. Микроструктура образца из БрБ2 в исходном состоянии, $\times 500$

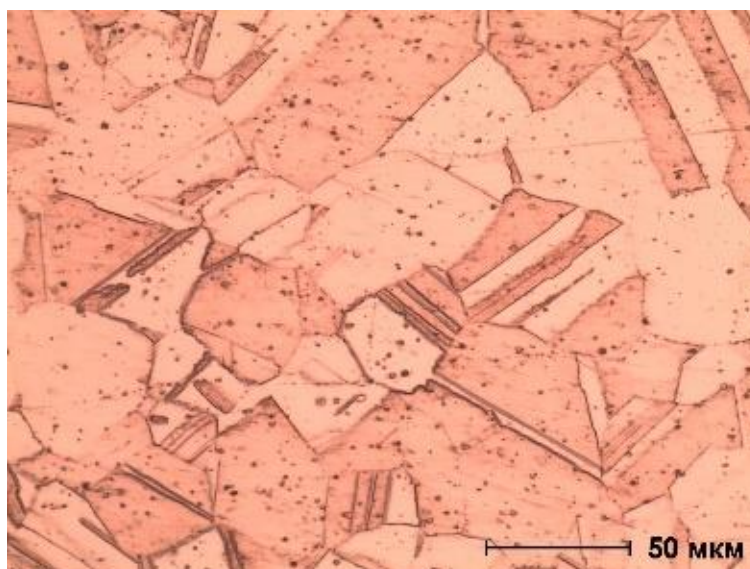


Рис. 3. Микроструктура образца после закалки в газе, $\times 500$

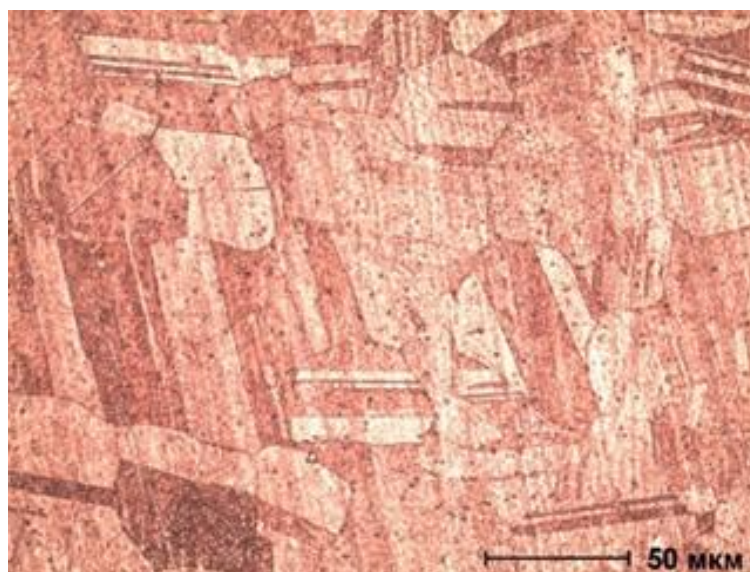


Рис.4. Микроструктура образца после закалки в воде, $\times 500$

Размер зерен α -фазы в исходном образце намного мельче, чем в остальных. Возможно, образец после прокатки был подвергнут рекристаллизационному отжигу. После закалки структура состоит из крупных равноосных зерен α -фазы и включений избыточной β -фазы.

Для определения микротвердости образцов использовали микротвердомер DuraScan 70. Нагрузка составляла 25 г.

Результаты измерения микротвердости образцов представлены в таблице 3.

Таблица 3. Результаты измерения микротвердости образцов

Толщина образца, мм	Состояние	HV _{0,025}
0,5	Исходное	196,8 ± 4,02
	Закалка в газе 1	210,5 ± 7,03
	Закалка в газе 2	217,5 ± 6,16
	Закалка в воде	174,9 ± 15,65
	Закалка в воде + старение	458,6 ± 8,31
	Закалка в газе + старение	428,1 ± 7,69
0,1	Исходное	179,1 ± 3,15
	Закалка в газе 1	181,7 ± 1,70
	Закалка в газе 2	188,2 ± 6,50
	Закалка в воде	221,6 ± 5,17
	Закалка в воде + старение	418,8 ± 10,37
	Закалка в газе + старение	408 ± 11,51
0,05	Исходное	207,6 ± 3,69
	Закалка в газе 1	176,6 ± 7,97

Значения твердости образцов в исходном состоянии примерно равны твердости после закалки. После старения наблюдается значительное повышение твердости за счет распада пересыщенного α -твердого раствора. Упрочнение образцов после закалки в воде выше, чем после закалки в газе, вследствие большего пересыщения при охлаждении с большей скоростью.

При закалке рулонов из БрБ2 в газе регистрировали кривые охлаждения с помощью термопары, которую размещали по середине высоты и середине толщины каждого рулона.

Моделирование процесса закалочного охлаждения бериллиевой бронзы проведено с использованием программного комплекса ANSYS для образцов с разной толщиной рулона. Для проведения расчета в программу вводятся теплофизические характеристики материала образца и температурная зависимость коэффициента теплоотдачи охлаждающей среды. На рис. 5 показано распределение температуры в рулоне толщиной 15 мм через 100 с после начала охлаждения.

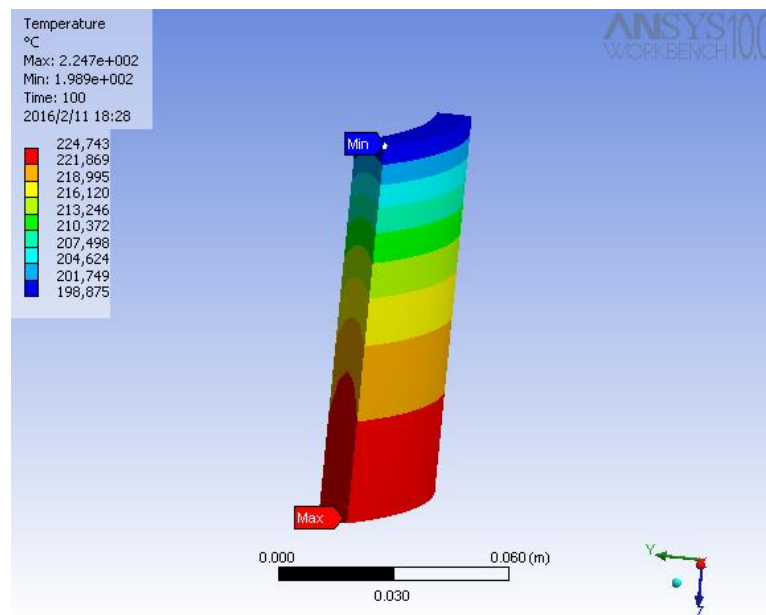


Рис. 5. Распределение температуры в образце через 100 с после начала охлаждения

Расчетные кривые охлаждения были наложены на термокинетическую диаграмму превращений α -твердого раствора [1] (рис. 6). С ее помощью можно выбрать скорость охлаждения, отвечающую получению пересыщенного α -твердого раствора (область I). При меньшей скорости охлаждения фиксируется пограничный распад (область II), а при еще меньшей – общее выделение (область III), что уже не обеспечивает высокого упрочнения при последующем старении [1].

Расчетные и экспериментальные кривые охлаждения практически совпадают. Однако, обе кривые попадают в область II, поэтому происходит выделение β -фазы, что подтверждают исследования микроструктуры (см. рис. 3, 4).

Результаты моделирования охлаждения рулонов с другими геометрическими размерами показали, что кривая охлаждения центра рулона толщиной 5 мм проходит по границе областей I и II термокинетической диаграммы, следовательно, 5 мм – максимальная толщина рулона, обеспечивающая закалку ленты из БрБ2 с получением однофазного твердого раствора (рис. 7).

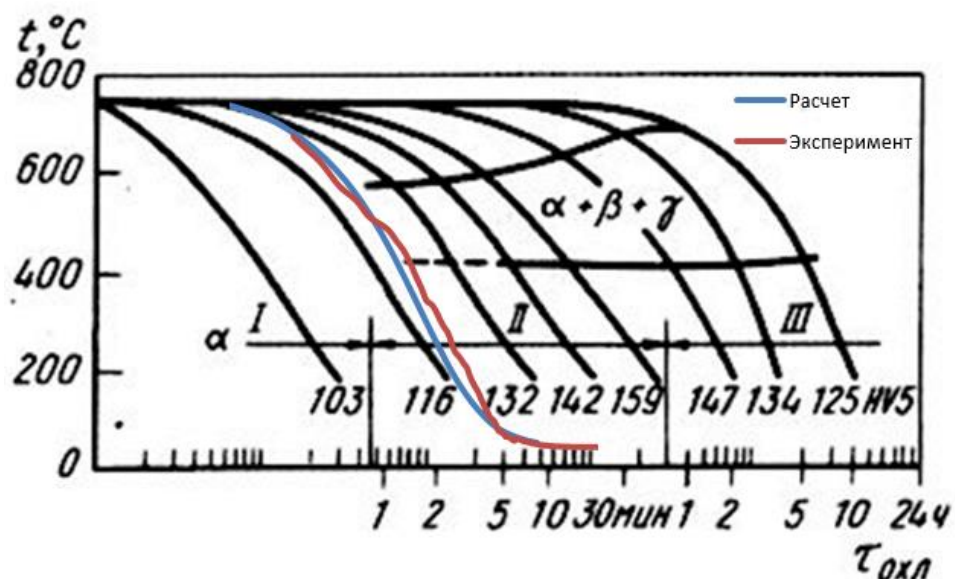


Рис. 6. Кривые охлаждения центра рулона толщиной 15мм из ленты толщиной 0,5 мм, наложенные на термокинетическую диаграмму БрБ2

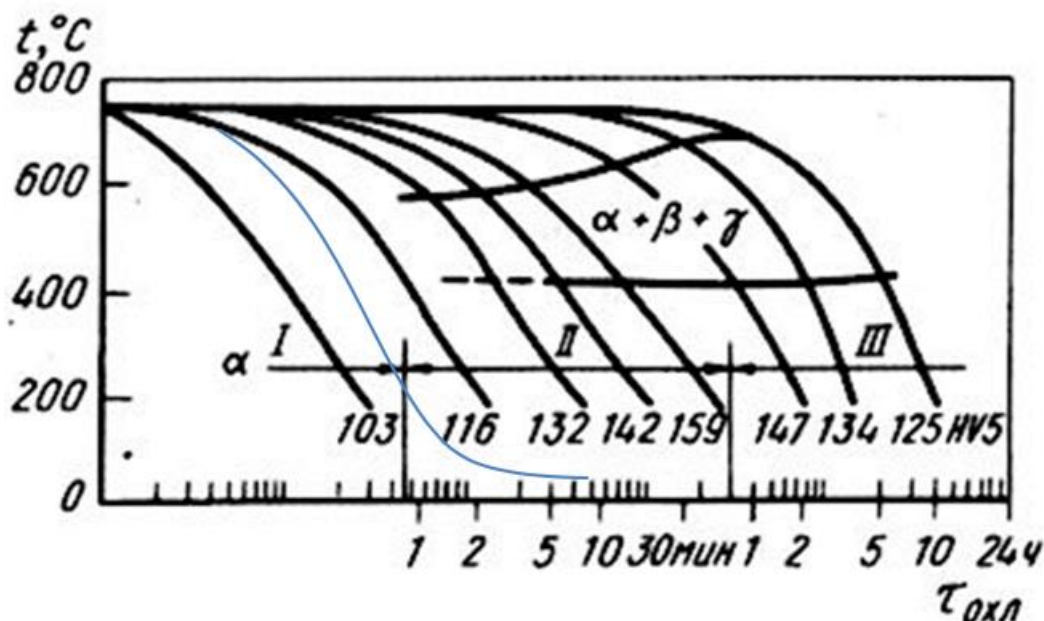


Рис. 7. Кривая охлаждения для рулона толщиной 5 мм из ленты толщиной 0,5 мм

Выводы: результаты экспериментов подтверждают, что с помощью закалки бериллиевых бронз в азоте можно получить высокие значения механических свойств. Скорость охлаждения образцов при закалке в азоте является удовлетворительной, однако при такой скорости происходит пограничный распад, т.е. выделение избыточной β -фазы. Прирост микротвердости при старении образцов после закалки в газе незначительно (на 10 %) уступает приросту микротвердости после закалки в воде вследствие большего пересыщения при охлаждении с более высокой скоростью.

С помощью моделирования процесса охлаждения при закалке было установлено, что максимальная толщина рулона из ленты БрБ2, при которой скорость охлаждения отвечает максимальной степени пересыщения α -твердого раствора, составляет 5 мм.

Литература

1. Пастухова Ж.П., Рахитадт А.Г. Пружинные сплавы цветных металлов. 2-е изд. – М.: Металлургия, 1983. – 364 с.
2. Смирягин А.П. Промышленные цветные металлы и сплавы. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Государственное научно-техническое издательство литературы по черной и цветной металлургии, 1956. – 560 с.
3. Арзамасов Б.Н., Макарова В.И., Мухин Г.Г. и др. Материаловедение: Учебник для вузов / под общ.ред. Б.Н. Арзамасова, Г.Г. Мухина. 8-е изд., стереотип. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 648 с.: ил.