

Мысик Р.К., Сулицин А.В., Брусницын С.В.  
R. K.Mysik, A.V.Sulitsin, S.V.Brusnitsin

## ИЗУЧЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ЛИТЬЯ И ДЕФОРМАЦИИ ВЫСОКОХРОМОВОЙ БРОНЗЫ

## INVESTIGATION OF CASTING AND DEFORMATION FEATURES OF HIGH CHROMIUM BRONZE



**Мысик Раиса Константиновна** – доктор технических наук, профессор кафедры «Литейное производство и упрочняющие технологии» ГОУВПО «Уральский государственный технический университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» (г. Екатеринбург). E-mail: kafedralp@mail.ru.

**Ms. Raisa K. Mysik** – Doctor of Engineering, Professor of The Department of Foundry Engineering and Strengthening Technology, the Urals State Technical University named after Boris Yeltsin, (city of Yekaterinburg), e-mail: [kafedralp@mail.ru](mailto:kafedralp@mail.ru).



**Сулицин Андрей Владимирович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Литейное производство и упрочняющие технологии» ГОУВПО «Уральский государственный технический университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» (г. Екатеринбург). E-mail: kafedralp@mail.ru.

**Mr. Andrey V. Sulitsin** – PhD in Engineering, Associate Professor at the Department of Foundry Engineering and Strengthening Technology, the Urals State Technical University named after Boris Yeltsin, (city of Yekaterinburg), e-mail: [kafedralp@mail.ru](mailto:kafedralp@mail.ru).



**Брусницын Сергей Викторович** – доктор технических наук, доцент кафедры «Литейное производство и упрочняющие технологии» ГОУВПО «Уральский государственный технический университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» (г. Екатеринбург). E-mail: kafedralp@mail.ru.

**Mr. Sergey V. Brusnitsyn** - Doctor of Engineering, Associate Professor at the Department of Foundry Engineering and Strengthening Technology, the Urals State Technical University named after Boris Yeltsin, (city of Yekaterinburg), e-mail: kafedralp@mail.ru.

**Аннотация:** В работе рассмотрены технология получения высокохромовой бронзы и возможности ее дальнейшей пластической деформации, показано влияние различных видов термомеханической обработки на свойства высокохромовой бронзы.

**Summary:** The paper examines the technology of producing high chromium bronze. Potentials for its further plastic deformation are considered. The article also shows the influence of different ways of thermal and mechanical treatment on the properties of high chromium bronze.

**Ключевые слова:** высокохромовая бронза, легирование, деформация, термическая обработка.

**Keywords:** high chromium bronze, alloying, deformation, heat treatment.

УДК 621.74:669.35.6

В промышленном производстве появилось новое направление совместного использования меди и хрома в композициях, в которых хрома содержится от 0,8 до 30 % и более. В зарубежной технической литературе эти материалы получили название HIGH CHROMIUM

COPPER BASE ALLOY [2] – высокохромовых сплавов на основе меди в отличие от низколегированной хромовой бронзы. Разработка и применение этих сплавов связаны с дальнейшим улучшением характеристик электротехнических и конструкционных материалов. Цель настоящей работы состояла в получении высокохромового сплава и определении возможности его дальнейшей пластической обработки.

Известно, что легирование меди хромом можно осуществлять двумя способами – лигатурой медь-хром и чистым хромом. Выплавку лигатуры желательнее вести в вакуумной печи во избежание насыщения ее кислородом и больших потерь хрома. Однако при выплавке лигатуры расплав необходимо перегреть до температуры 1600 °С и выдерживать его в печи до полного растворения хрома около 1 ч. Это приводит к частым заменам графитового тигля, а также взаимодействию расплава с графитом и графито-шамотной воронкой, вымыванию из тигля частиц графита и увлечению их в расплав. В результате в полуфабрикатах из сплавов Cu-Cr наблюдаются включения темного цвета [3]. Далее, поскольку содержание хрома в лигатуре не велико (как правило, не превышает 6 – 7 %), то доля лигатуры в составе шихты значительна и иногда достигает 22 – 25 %. Более того, неоднородность лигатуры по составу затрудняет шихтовку сплава. Имеется опыт получения полуфабриката сплава Cu-Cr с содержанием хрома 18 – 22 %, предусматривающий быстрый нагрев и расплавление шихты, перегрев расплава до 1600 – 1700 °С, введение хрома и разливку при температуре 1450 – 1500 °С в водоохлаждаемую изложницу. Высокая температура расплава приводит к быстрому выходу тигля из строя, насыщению расплава газами и большой вероятности образования горячих трещин.

Шихта для плавки состояла из катодной меди марки М1к по ГОСТ 859-2001, металлического хрома марки Х98,5 по ГОСТ 5905-2004 и раскислителя – магния марки Мг90 по ГОСТ 804-93. Плавку проводили в вакуумной индукционной печи. После расплавления меди при температуре расплава 1260 – 1280 °С вводили магний, после него присаживали хром в медной фольге. Отливку слитка проводили в чугунную изложницу диаметром 250 мм и высотой 500 мм.

Химический анализ сплава показал содержание в нем хрома около 4 %. Этот слиток являлся шихтовой заготовкой для дальнейшего его переплава. При последующем расплавлении этой шихтовой заготовки в расплав вводили хром, раздробленный на куски диаметром 3 – 5 мм. Шихтовали на содержание хрома около 30 %. Расплав разлили в изложницу. Анализ химического состава сплава проводили на оптическом эмиссионном спектрометре SPECTROLAB S. Анализ показал значительную неоднородность сплава по содержанию хрома. В среднем содержание хрома в сплаве составило 16 – 17 %.

Из полученного слитка вырезали темплеты, которые подвергали различным видам исследования и термомеханической обработки.

Микроструктура полученного слитка приведена на рис. 1. Полученный материал представляет собой твердый раствор хрома в меди, включающий частицы нерастворенного хрома.

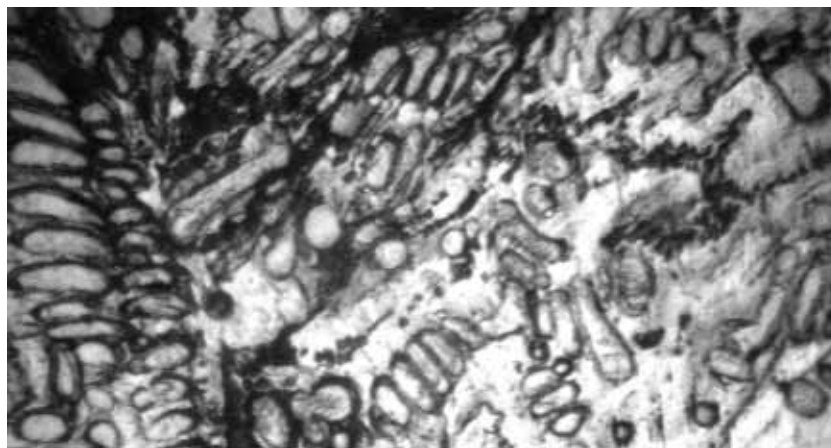


Рис. 1. Микроструктура высокохромовой бронзы, x100

В качестве вариантов обработки давлением применены горячая ковка и холодная осадка, в качестве вариантов термической обработки – отжиг, закалка и старение.

Использованы следующие методы испытания образцов: определение твердости по Бринеллю НВ шариком диаметром 10 мм, определение напряжения пластического течения  $\sigma_s$  (сопротивления деформации) при осадке кубических образцов.

Измерение твердости образцов в литом состоянии показало значительный разброс значений в пределах 43 – 67 при среднем значении 55 и при отклонениях от этой величины в пределах 22 %. Это говорит о высокой неоднородности распределения механических свойств, что может быть обусловлено различиями в химическом и фазовом составе, а также структуре сплава.

Закалка образцов производилась путем нагрева до температуры 920 °С, выдержки в печи в воздушной среде в течение 20 мин и охлаждения в воде. Поскольку образцы имели небольшую массу, то времени выдержки оказывалось достаточно для их прогрева, большую выдержку не применяли из-за опасности чрезмерного окисления хрома. Микроструктура сплава в литом состоянии после закалки представлена на рис. 2.

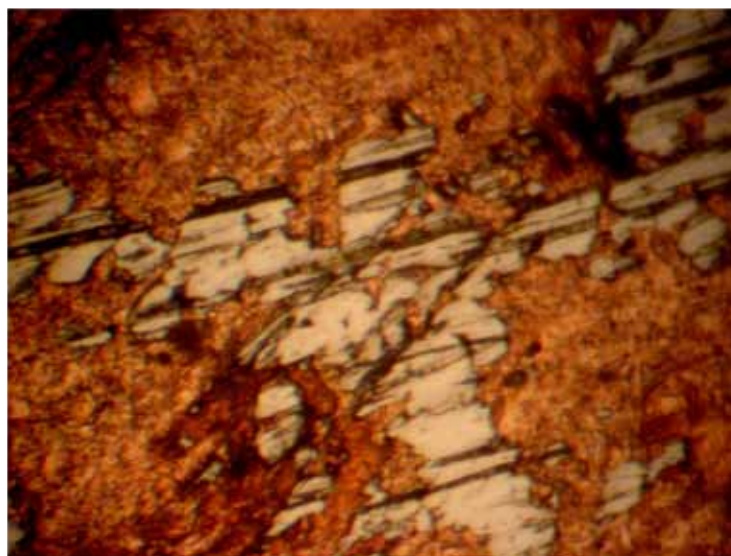


Рис. 2. Микроструктура литого высокохромового сплава

В результате закалки диапазон значений твердости НВ составил 57 – 62 единиц при среднем значении 60 единиц и при отклонениях от этой величины в пределах 4 %, что говорит о выравнивании механических свойств в результате такой термообработки.

Часть образцов была подвергнута горячей ковке на молоте в температурном диапазоне 700 – 900 °С при относительных обжатиях 50 – 70 %. В горячем состоянии материал показал высокий уровень пластичности. Диапазон твердости НВ в результате такой обработки составил 72 – 80 при среднем значении 76 и при отклонениях от среднего значения в пределах 11 %. Такой большой диапазон отклонений объясняется неоднородным остыванием образцов на более холодных бойках молота.

Применение после горячейковки отжига при 920 °С в течение 20 мин привело к уменьшению твердости до 64 – 66 единиц с отклонениями в 1 %, что говорит о выравнивании механических характеристик по объему. Закалка с той же температуры обеспечила получение твердости 69 – 72 НВ, что выше, чем в случае отжига, на 9 %. На рис. 3, 4 показаны микроструктуры сплава послековки и отжига, а также после горячейковки при 920 °С, деформации 60 % и старения при 500 °С в течение 20 мин.

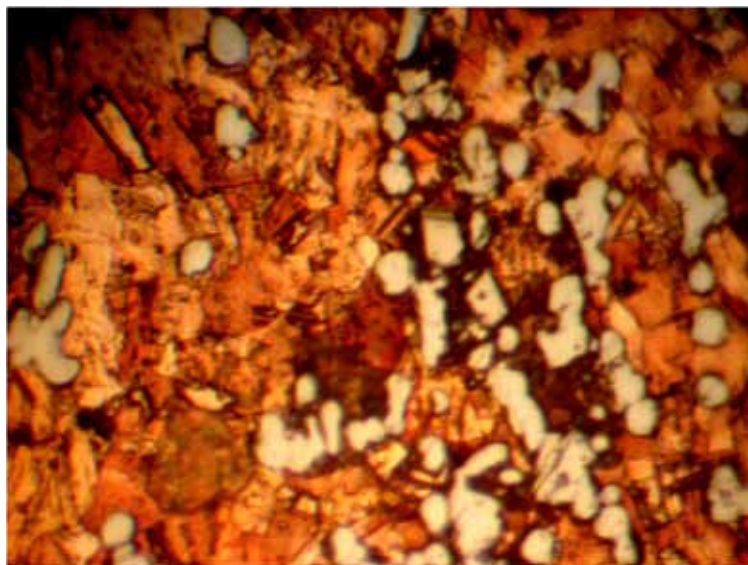


Рис. 3. Микроструктура высокохромового сплава после горячейковки при 920 °С, х100

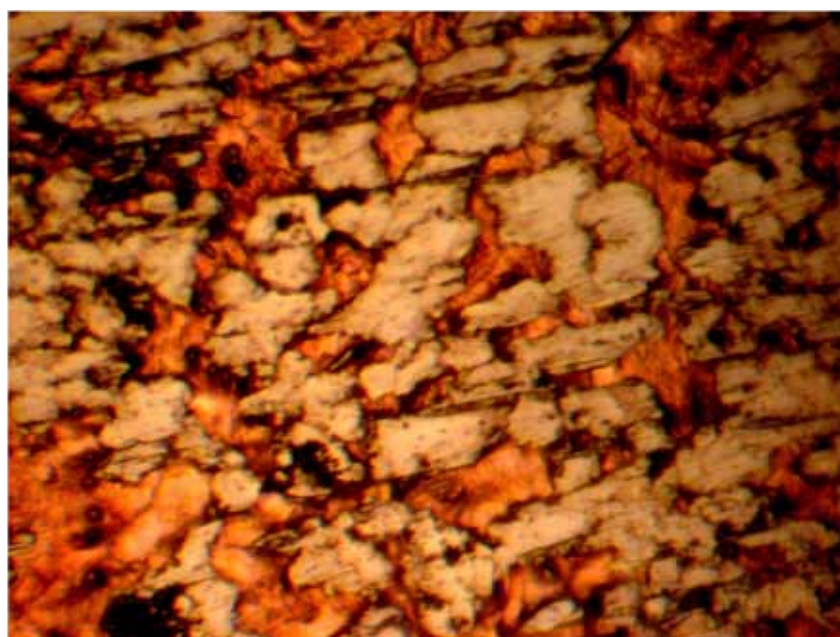


Рис. 4. Микроструктура высокохромового сплава после горячейковки при 920 °С, закалки с 920 °С и старения при 500 °С в течение 20 мин, х100

После закалки применили операцию холодной осадки на шлифованных бойках со смазкой в двух вариантах проведения экспериментов. В первом варианте выполняли осадку с замером силы деформации в пошаговой процедуре нагружения, что позволило рассчитать напряжение перехода в пластическое состояние (сопротивление деформации) в функции относительного обжатия. В результате построена кривая упрочнения для сплава в этом состоянии (см. рис. 5).



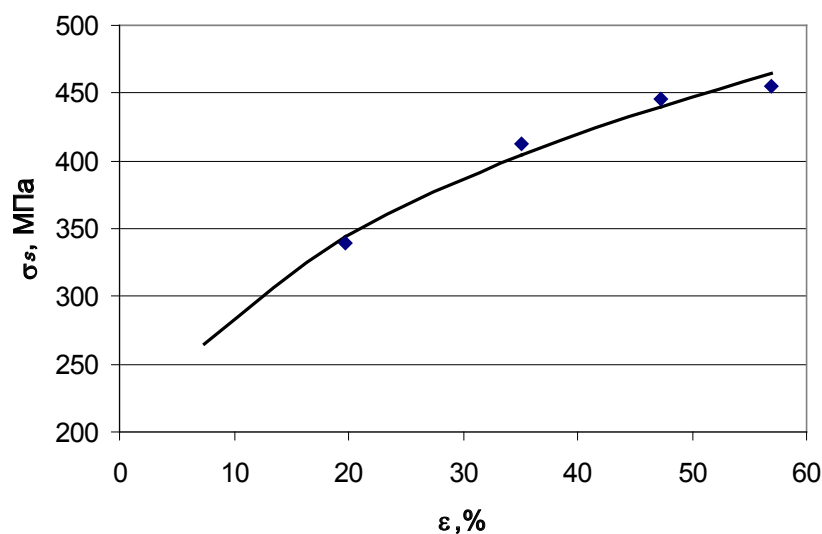


Рис. 5. Зависимость сопротивления деформации высокохромовой бронзы от относительного обжатия при холодной осадке после горячей деформации и закалки

Поскольку основу материала составляет матрица из низкохромовой бронзы с включениями хрома, то можно сравнить эти данные с величиной предела текучести для этой бронзы. По данным справочника [1] для закаленного состояния хромовых бронз с содержанием хрома от 0,85 до 1,0 % характерны пределы текучести от 60 до 99 МПа в зависимости от химсостава и состояния заготовки (литая, горячекованная, прессованная, горячекатаная, холоднокатаная). Как видно из графика, даже при относительном обжатии 10 % полученное значение сопротивления деформации 260 МПа превышает предел текучести низкохромовой бронзы в 3 – 4 раза.

Для возможности выполнения инженерных расчетов график зависимости рис. 5 аппроксимирован функцией вида

$$\sigma_s = 50 + 111\varepsilon^{0,325}, \quad (1)$$

где  $\varepsilon$  выражено в процентах, область определения  $\varepsilon = 10 - 60 \%$ .

На рис. 6 отражены результаты измерения твердости образцов, предварительно закаленных, а затем деформированных с различной величиной обжатия при холодной осадке. Видно, что в исследованном интервале обжатий твердость закаленной бронзы удается увеличить с 72 до 114 единиц, для сравнения можно отметить, что твердость низкохромовой бронзы в состоянии закалки составляет 65 единиц.

В справочнике [1] рассмотрены различные режимы старения низкохромовой бронзы. В поставленных опытах был выбран режим выдержки при температуре 500 °С в течение 20 мин. Относительно малое время старения было выбрано исходя из учета опасности окисления и газонасыщения хрома. Судя по данным источника [1], этот режим обеспечивает для сплава меди с 0,91 % хрома достижение максимальной твердости около 110 НВ. В условиях опыта в результате старения была повышена твердость до 134 единиц. Следует отметить, что режимы термомеханической обработки в данном исследовании, скорее всего, не являются оптимальными, об этом говорит тот факт, что при обработке низкохромовой бронзы при применении только операции старения достигают увеличения твердости на 50 единиц (с 60 до 110 НВ), т.е. почти вдвое, чего не было достигнуто в опытах. В связи с этим для нахождения оптимальных параметров термомеханической обработки нужны дополнительные эксперименты.

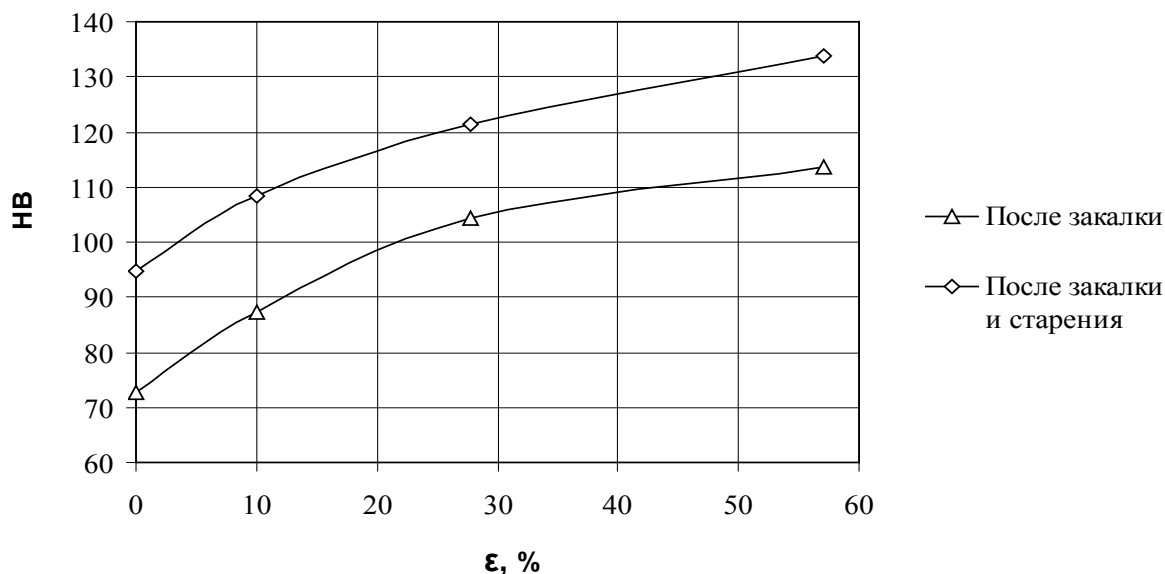


Рис. 6. Зависимость твердости от относительного обжатия для высокохромовой бронзы при холодной деформации

На рис. 7 представлена сводная диаграмма, которая позволяет оценить характер каждой из операций обработки в формировании свойств высокохромовой бронзы.



Рис. 7. Зависимость твердости высокохромовой бронзы от вида термомеханической обработки

Из диаграммы видно, что методами улучшения свойств бронзы из литого состояния являются деформация и термическая обработка, выполняемые в определенной последовательности.

Работа выполнялась при поддержке Совета по грантам Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых Российских ученых.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Осинцев, О.Е. Медь и медные сплавы. Отечественные и зарубежные марки: справочник / О.Е. Осинцев, В.Н. Федоров. – М.: Машиностроение, 2004. – 336 с.
2. Пат. 6065659 Япония, МКИ C22B9/20; C22C1/02; C22C9/00; C22B9/16. Manufacture of high chromium copper base alloy/ Nakanishi Masamitsu; Nakanishi Akira; Wakaumi Hisao; заявитель Nakanishi Masamitsu; publ. 08.03.94.
3. Производство отливок из цветных сплавов / А.В. Курдюмов [и др.]. – М.: МИСиС, 1996. – С. 502.