

# Влияние состава бронзовых отливок для колоколов на их акустические характеристики

Кобзев М.В. (МКМ-09с)\*

Донецкий национальный технический университет

Состав колокольной бронзы строго регламентирован количественным соотношением  $Cu$  и  $Sn$ . На диаграмме (рис.1) область колокольных бронз заштрихована. При принятом составе свойства бронзы определяются образующимися в сплаве фазами. В области состава колокольного сплава диаграммы  $Cu-Sn$  существует две структурные составляющие -  $\alpha$  и  $\beta$ -фазы;  $\alpha$ -твердый раствор мягок и пластичен, поэтому количество  $\alpha$ -фазы определяет пластичность сплава. С увеличением содержания  $Sn$  появляется двухфазная область ( $\alpha+\beta$ ), т.е. механическая смесь обеих фаз  $\epsilon$ - и  $\eta$ -фазы.

Наибольший интерес для колокольной бронзы представляет  $\delta$ -фаза. В ее основе лежит интерметаллическое соединение  $Cu_{31}Sn_8$ , которое, как показывают исследования, является определяющим для акустических свойств колоколов. Эта фаза кристаллизуется в очень узком интервале и при  $350^\circ C$  должна распадаться на  $\alpha+\epsilon$  фазы. Из-за очень малой скорости этого процесса, в большинстве случаев, метастабильная  $\beta$ -фаза сохраняется при нормальных условиях.

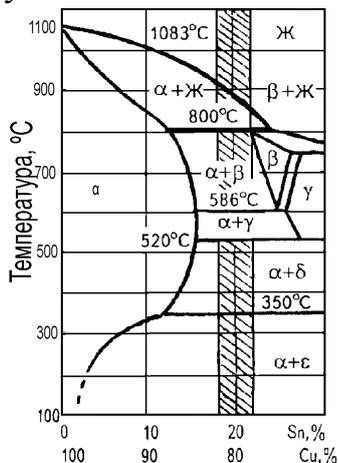


Рисунок 1 – Диаграмма состояния системы  $Cu-Sn$  (содержание  $Sn$  до 30%)

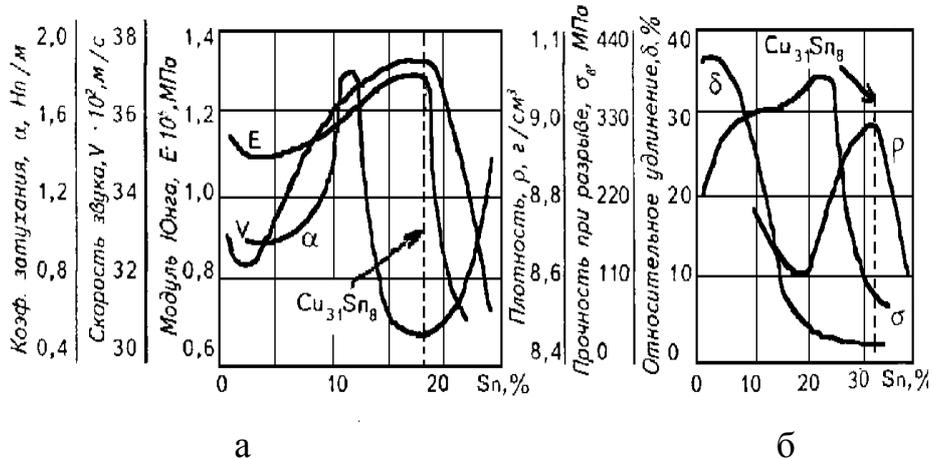


Рисунок 2 – Влияние  $Sn$  на акустические (а) и физико-механические (б) свойства колокольной бронзы

Исследования показывают влияние фазового состава материала колокола на его звучание (рис.2). Все измеренные характеристики меняются пропорционально относительному содержанию  $\delta$ -фазы, причем этот результат обнаруживается на каждом из акустически значимых свойств сплава. Существует много других факторов, влияющих на акустические характеристики колокола. Наиболее важными из них являются правильное

\* Руководитель - к.т.н., доцент кафедры ЦМ и КМ Пасечник С.Ю.

построение профиля колокола. Частотная характеристика колокола заложена в самой конструкции и зависит от размеров колокола, его профиля, модуля упругости Юнга, коэффициента Пуассона и плотности материала. Для колоколов одинакового профиля эта зависимость выражается формулой подобия Хланди:

$$f \sim \frac{T}{D^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}},$$

где  $f$  — частота, Гц;  $T$  — толщина, см;  $D$  — диаметр, см;  $E$  — модуль упругости Юнга МПа;  $\rho$  — плотность материала, г/см<sup>3</sup>.

В этой формуле не учитывается коэффициент Пуассона, характеризующий отношение продольных и поперечных упругих свойств материала, так как для большинства металлов он равен  $\sim 0,3$ .

Из формулы подобия Хланди можно сделать вывод, что с разрыхлением бронзы уменьшается ее упругость и вследствие этого падает частотная характеристика колокола.

Таким образом, определяющим в акустическом отношении является интерметаллическое соединение  $\text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$ . Это соединение, однако, обладает исключительной хрупкостью - колокол, отлитый из бронзы состава, %: 67,5 *Cu* и 32,5 *Sn*, требует очень осторожного обращения. Колокольный сплав с 20-22% *Sn* попадает почти на границу области допустимой хрупкости. Оптимум пропорций компонентов в сплаве при этом очевиден: с одной стороны - как можно больше олова, чтобы увеличить долю носителя специальных свойств сплава - "резонансной"  $\delta$ -фазы; с другой стороны - не настолько много олова, чтобы лишить сплав демпфирующей способности матрицы - пластичной  $\alpha$ -фазы. При повышении содержания олова меняется и цвет - металл белеет, и характер звучания - звук становится чище, звонче, мелодичнее.

Большой разброс содержания  $\delta$ -фазы может быть вызван различными температурными параметрами при заливке бронзы, ее кристаллизации и охлаждении.

Хрупкость колокольной бронзы также определяется наличием таких вредных примесей, как Al, Bi, Fe, Ni и, особенно, As.

Выводы:

1. Особые свойства колокольной бронзы, как акустического сплава, связаны, в основном, с наличием в ее основе интерметаллического соединения  $\text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$ , все же остальные факторы имеют подчиненное значение.

2. Для получения отливок колоколов с нужными акустическими свойствами, необходимо в отливках регламентировать количество и распределение  $\delta$ -фазы, что в прямую зависит от технологии литья.

3. В дальнейшем планируется провести исследования по корректировке технологии получения подобных отливок, например, с помощью специальных способов литья (в частности с применением металла, полученного в электрошлаковых тигельных печах).