



## Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: [http://journals.nstu.ru/obrabotka\\_metallov](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)



### Структура и свойства термически обработанной литой в металлическую форму бронзы БрС10О10Н5

Николай Клочков<sup>1, a, \*</sup>, Юрий Егоров<sup>1, b</sup>, Олег Утьев<sup>1, c</sup>, Сильвия Барелла<sup>2, d</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет, пр. Ленина, 30, г. Томск, 634050, Россия

<sup>2</sup> Миланский политехнический университет, Пьяцца Леонардо да Винчи, 32, г. Милан, 20133, Италия

<sup>a</sup>  <https://orcid.org/0000-0003-3763-5117>,  [nikart2012@gmail.com](mailto:nikart2012@gmail.com), <sup>b</sup>  <https://orcid.org/0000-0001-8929-5623>,  [yuri.egorovv@yandex.ru](mailto:yuri.egorovv@yandex.ru),

<sup>c</sup>  <https://orcid.org/0000-0001-7712-3859>,  [utievv@mail.ru](mailto:utievv@mail.ru), <sup>d</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-1866-6674>,  [silvia.barella@polimi.it](mailto:silvia.barella@polimi.it)

#### ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 669.1

#### История статьи:

Поступила: 23 марта 2019

Рецензирование: 03 апреля 2019

Принята к печати: 07 мая 2019

Доступно онлайн: 15 июня 2019

#### Ключевые слова:

Термическая обработка  
 Свинцово-оловянистая бронза  
 Механические свойства  
 Триботехнические характеристики

#### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Свинцово-оловянистые бронзы являются одними из востребованных среди материалов для производства изделий, работающих в условиях трения и износа. В большинстве случаев данные изделия наравне с высокими антифрикционными свойствами должны обладать повышенной прочностью. Однако включения свинца в данном материале заметно снижают прочность, что приводит к преждевременному разрушению. Несмотря на существующее достаточно большое количество способов повышения прочности свинцово-оловянистых бронз, некоторые из них трудно выполнимы и нестабильны в масштабах реального производства, а другие не доведены до стадии широкого практического применения. Поэтому поиск способов повышения прочностных характеристик бронзы, содержащей свинец, остается актуальной задачей. **Цель работы:** изучение структуры, механических и триботехнических свойств свинцово-оловянистой бронзы, легированной никелем после термической обработки. **В работе исследована** бронза БрС10О10Н5, полученная плавкой чистых шихтовых материалов на тиристорной установке в тигле из силицированного графита с последующей заливкой в металлическую форму. Образцы подвергали старению при температуре 300...500 °С. **Методами исследования** являются механические испытания на статическое растяжение и триботехнические испытания, а также спектральный анализ химического состава и металлографические исследования свинцово-оловянистой бронзы, легированной никелем. **Результаты и обсуждения.** Известно, что одним из способов изменения структуры и свойства материала является термическая обработка, в результате которой формируется структура, создаваемая дисперсионным разложением после закалки и старения. В результате происходит образование упорядоченных структур, что приводит к увеличению твердости до максимального значения. Установлено, что максимальная твердость (138 НВ) бронзы БрС10О10Н5 достигается старением при температуре 325 °С в течение четырех часов. После старения образцов происходит рост прочностных характеристик – предела текучести на 10 %, предела прочности на 24 %. Усредненные значения результатов энергодисперсионного рентгеновского спектрометрического анализа (EDS) выделенной фазы указывают на то, что укрупненные дисперсные частицы являются тройным химическим соединением, предположительно Cu<sub>9</sub>NiSn<sub>3</sub>. Исследованы триботехнические характеристики бронзы до и после старения. Было определено, что свинец в составе бронзы снижает коэффициент трения в два раза. Термическая обработка не оказала существенного влияния на коэффициент трения бронзы БрС10О10Н5. Износостойкость бронзы со свинцом после термической обработки в два раза выше, чем у бронзы до термической обработки, и в пять раз выше, чем у бронзы без свинцовых включений. Представленные результаты показывают возможности применения термической обработки для повышения прочности и износостойкости свинцово-оловянистой бронзы с добавками никеля.

**Для цитирования:** Структура и свойства термически обработанной литой в металлическую форму бронзы БрС10О10Н5 / Н.С. Клочков, Ю.П. Егоров, О.М. Утьев, С. Барелла // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2019. – Т. 21, № 2. – С. 145–153. – DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.2-145-153.

#### \*Адрес для переписки

Клочков Николай Сергеевич, аспирант  
 Томский политехнический университет,  
 пр. Ленина, 30,  
 г. Томск, 634050, Россия  
 Тел.: 8 (382) 270-17-17, e-mail: [nikart2012@gmail.com](mailto:nikart2012@gmail.com)

## Введение

В машиностроении для производства деталей, работающих в условиях трения и знакопеременных нагрузках, применяются оловянистые бронзы с добавками свинца. Благодаря присутствию свинцовых включений материал обладает

высокими антифрикционными характеристиками, хорошей прирабатываемостью, высокой обрабатываемостью резанием [1,2]. Свинцово-оловянистую бронзу целесообразно использовать не только при производстве подшипников скольжения, но и для колес зубчатых передач, маслоплотных и поршневых колец, уплотнений гидроцилиндров и т.д. Однако статистика эксплуатации изделий из оловянистой бронзы с добавками свинца показывает значительное количество случаев разрушения из-за свинцовых включений, которые являются концентраторами разрушения [3–5].

Одним из способов изменения структуры и свойства материала является термическая обработка, в результате которой формируется структура, создаваемая дисперсионным разложением во время термической обработки – после закалки и старения [6–16].

Как известно, растворимость олова в меди невысокая и существенно меняется с понижением температуры (с 13,5 % при 798 °С до 1 % при 200 °С). Из этого следует невозможность образования пересыщенного твердого раствора олова в меди при быстром охлаждении. В работах [7 и 8] указывается на то, что закалка и отпуск оловянистых бронз возможны, но не находят практического применения ввиду незначительных изменений механических свойств. Для облегчения обработки давлением данных бронз проводят гомогенизацию – нагрев до 600...650 °С, выдержка в течение 2...2,5 ч и медленное охлаждение (с печью) [9–11]. Также нельзя не отметить тот факт, что в случае присутствия легкоплавкой свинцовой составляющей в составе оловянистой бронзы существуют ограничения по температурному режиму нагрева для термической обработки. Практически только бериллиевые бронзы можно подвергать закалке и старению благодаря сильному уменьшению концентрации легирующего компонента в  $\alpha$ -твердом растворе с понижением температуры. Однако существуют другие элементы, которые с медью образуют твердые растворы, к примеру, никель при высоких температурах растворяется в меди в больших количествах, но с понижением температуры растворимость его резко уменьшается [10, 14]. Таким

образом, легирование никелем может способствовать термическому упрочнению свинцово-оловянистой бронзы.

**Цель** данной работы заключается в изучении структуры, механических и триботехнических свойств свинцово-оловянистой бронзы, легированной никелем после термической обработки. Исходя из цели работы были поставлены следующие **задачи**: сравнить микроструктуру исследуемой бронзы до и после термической обработки; определить режим термической обработки для получения максимальных значений твердости и прочности бронзы; определить влияние термической обработки на триботехнические характеристики свинцово-оловянистой бронзы с добавками никеля.

### Методика исследований

Образцы для исследования получали литьем в кокиль. Сплав готовили плавкой из чистых шихтовых материалов (табл. 1) на высокочастотной тиристорной установке в тигле из силицированного графита, с последующей заливкой при температуре 1150 °С в металлическую форму. Температуру заливки контролировали при помощи быстродействующего инфракрасного оптического пирометра ТПТ-90 фирмы Agema (Швеция) с лазерным наведением. Для испытаний были подготовлены образцы размером 15 × 15 × 60 мм.

Анализ микроструктуры выполняли с помощью исследовательского оптического микроскопа AxioObserver A1.m фирмы Carl Zeiss (Германия). Анализ поверхности материала и состава приповерхностных слоев проводили на сканирующем электронном микроскопе EVO 50XVP фирмы Carl Zeiss с рентгеновским микроанализатором EDS. Для исследования микрострукту-

Таблица 1

Table 1

**Состав исследуемой бронзы**  
**The composition of the bronze**

Маркировка сплава Alloy marking	Массовая доля компонентов, % мас. Mass fraction of components, %			
	Cu	Pb	Ni	Sn
БрС10О10Н5 The bronze Cu-10Pb-10Sn-5Ni	75	10	5	10

ры готовились металлографические шлифы с помощью шлифовальных шкурок с различным размером зерна абразива. Окончательную полировку проводили на сукне с применением водного раствора окиси хрома. Структуру выявляли травлением образцов концентрированной соляной кислотой.

Старение при температуре 300...500 °С проводилось в муфельной печи с последующим охлаждением на воздухе. Твердость измеряли на твердомере Бринелля ТШ-2.

Механические характеристики определяли с использованием испытательной машины МИРИ-100К (Россия) с погрешностью измерения  $\pm 1\%$ . Для определения данных характеристик использовали схемы одноосного растяжения по ГОСТ 1497–84 на цилиндрических образцах с галтелями типа III с диаметром рабочей части 6 мм.

Трибологические испытания по схеме «шар-диск» проводили на установке Pin-on-Disk Tribometer (TRB) фирмы CSM Instrument и программного продукта TriboX Software version 4.1.I при нагрузке 5 Н. Продолжительность испытаний составляла 3000 циклов ( $\approx 56$  м). Материал «шарика» – сталь ШХ15.

Количественно потерю объема при изнашивании определяли по формуле [20]

$$\Delta V = Sl,$$

где  $S$  – площадь сечения бороздки износа,  $\text{мм}^2$ ;  $l$  – длина бороздки, мм. Приведенный износ  $I$  (величину, обратную износостойкости) рассчитывали с использованием нормировки потери объема при испытании  $\Delta V$  на величины пробега  $N$  (м) и приложенной нагрузки  $P$  (Н) [20]:

$$I = \Delta V / (NP), [\text{мм}^3 \cdot \text{Н}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}].$$

Для определения площади сечения бороздки износа применяли трехмерный бесконтактный профилометр Micro Measure 3D Station.

## Результаты и их обсуждение

На рис. 1 изображена микроструктура сплава БрС10О10Н5 в литом состоянии. Структура сплава состоит из  $\alpha$ -твердого раствора олова, никеля в меди, эвтектоида  $\alpha + \delta$  ( $\delta$  – химическое соединение  $\text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$ ) и включений свинца [10]. Свинцовые включения расположены в междендритном пространстве.

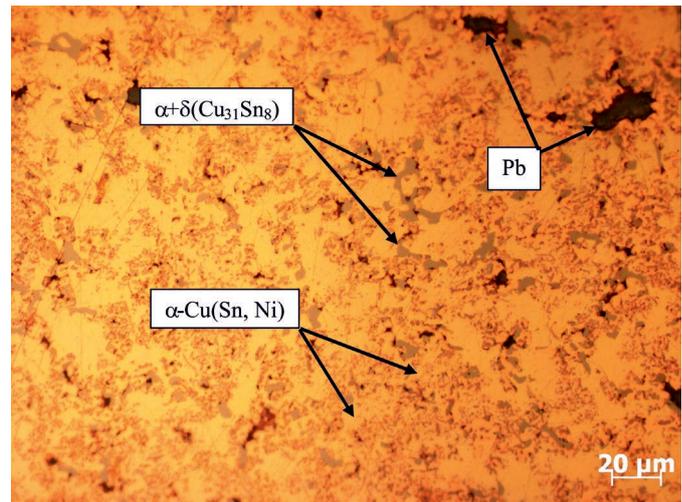


Рис. 1. Микроструктура БрС10О10Н5, оптическая микроскопия

Fig. 1. Microstructure of bronze Cu-10Pb-10Sn-5Ni, optical microscopy

На рис. 2 показано изменение твердости бронзы БрС10О10Н5 в зависимости от времени и температуры старения. Анализ приведенных зависимостей говорит о том, что твердость увеличивается со временем старения до максимального значения при температуре 325 °С, а затем уменьшается.

Образование упорядоченных структур при дисперсионном разложении в процессе старения увеличивает твердость до максимального значения. Увеличение времени старения приводит к дальнейшему выделению и укрупнению дисперсных частиц, что приводит к снижению твердости [2, 14].

На рис. 3 изображена микроструктура образцов после выдержки при температурах 325 и 500 °С в течение четырех часов. Микроструктура образцов после выдержки при температуре 325 °С (рис. 3, а) практически не отличается от микроструктуры бронзы в литом состоянии без проведения старения (см. рис. 2). После выдержки при температуре 500 °С (см. рис. 3, б) можно различить вдоль границы зерен выделения укрупненных дисперсных частиц.

Разложение твердого раствора происходит во время процесса старения [16]. Так как дисперсные частицы очень тонкие, поэтому различить и исследовать их с помощью оптической микроскопии достаточно сложно [14].

Для определения состава дисперсных частиц микроанализатором EDS (SEM) был проведен

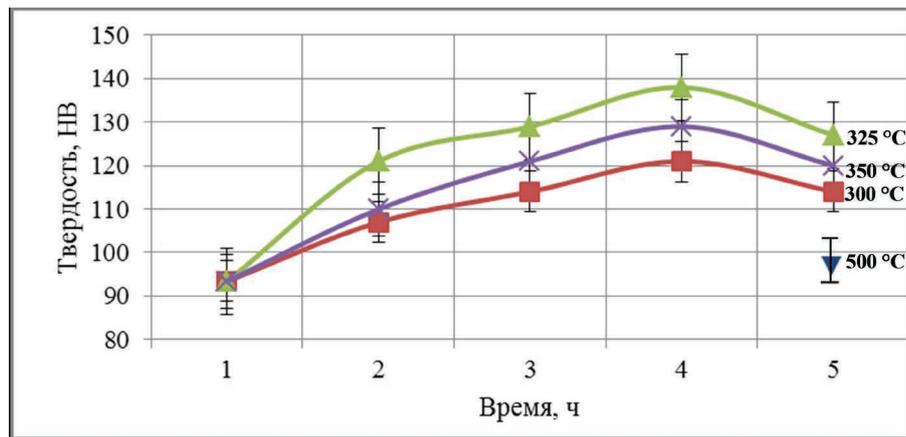


Рис. 2. Зависимость твердости бронзы БрС10О10Н5 от времени выдержки при разных температурах старения:

■ – 300 °С; ▲ – 325 °С; X – 350 °С; ▼ – 500 °С

Fig. 2. The dependence of the hardness of bronze Cu-10Pb-10Sn-5Ni on the time of aging:

■ – 300 °С; ▲ – 325 °С; X – 350 °С; ▼ – 500 °С

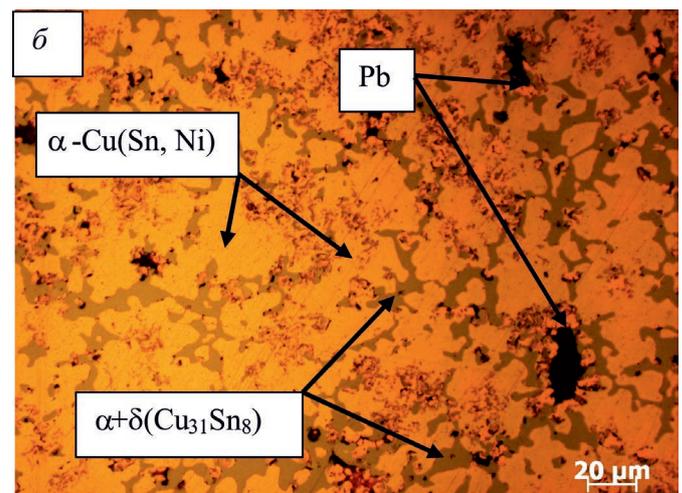
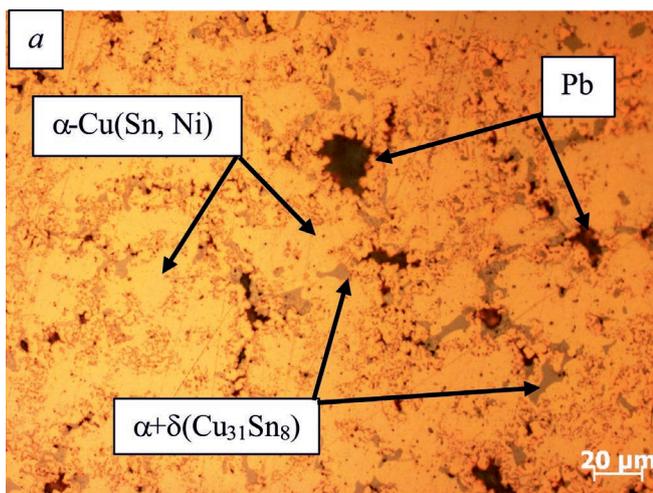


Рис. 3. Микроструктура БрС10О10Н5:

*a* – температура старения 325 °С, время выдержки 4 ч; *б* – температура старения 500 °С, время выдержки 4 ч

Fig. 3. Microstructure of bronze Cu-10Pb-10Sn-5Ni:

*a* – aging temperature 325 °С, soaking time 4 hours; *b* – aging temperature 500 °С, soaking time 4 hours

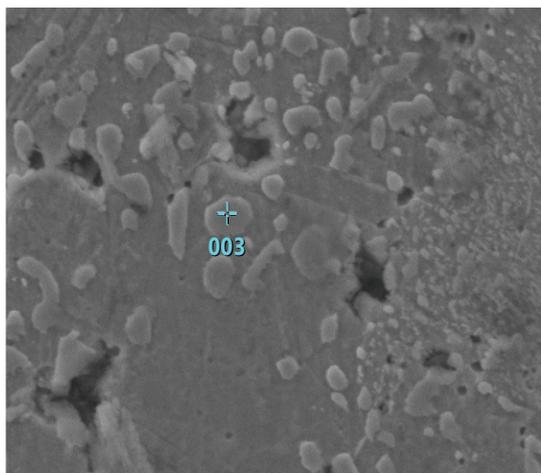
анализ выделенных фаз после перестаривания (рис. 4). Анализ проводился по нескольким частям с последующим усреднением результатов.

Усредненные значения результатов элементного анализа (табл. 2) выделенной фазы указывают на то, что укрупненные дисперсные частицы являются тройным химическим соединением, предположительно  $\text{Cu}_9\text{NiSn}_3$  [8,9].

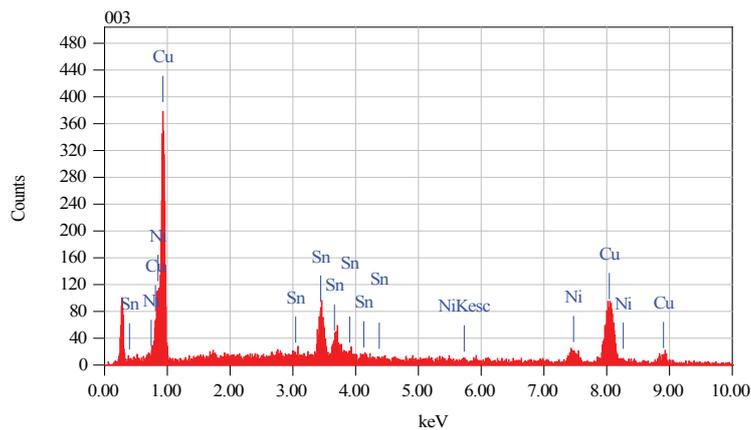
В табл. 3 показаны результаты механических испытаний бронзы БрС10О10Н5. Из

таблицы следует, что после старения образцов происходит рост прочностных характеристик – предела текучести на 10 %, предела прочности на 24 %.

В ходе трибологических испытаний определялись коэффициент трения и приведенный износ. Для сравнительной оценки влияния свинца испытывалась бронза без свинцовых включений – БрО10Н5. Результаты трибологических испытаний представлены на рис. 5 и 6.



*a*



*б*

*Рис. 4. Результаты EDS-анализа:*

*a* – микроструктура БрС10О10Н5 после перестаривания при температуре 500°С; *б* – энергодисперсионный рентгеновский спектрометрический анализ (EDS) в точке 003

*Fig. 4. The results of EDS-analysis:*

*a* – the structure of bronze Cu-10Pb-10Sn-5Ni after extended ageing at a temperature of 500 ° C; *б* – energy dispersive X-ray spectrometric analysis (EDS) at point 002

Таблица 2  
Table 2

**Результаты EDS-анализа**  
**The results of EDS-analysis**

Элемент Element	Масса,% Weight,%	Атом.,% Atom.,%
Ni	6,32	7,36
Cu	77,2	83,14
Sn	16,48	9,50

Таблица 3  
Table 3

**Механические характеристики бронзы БрС10О10Н5**  
**Mechanical characteristics of bronze Cu-10Pb-10Sn-5Ni**

Состояние материала State of the material	Предел текучести, $\sigma_p$ , МПа Yield stress, $\sigma_p$ , MPa	Временное сопротивление, $\sigma_b$ , МПа Tensile strength, $\sigma_b$ , MPa	Относительное удлинение, % Percent elongation,%
Литье в кокиль Chill casting	257,5	263,3	0,27
После старения при 325 °С, 4 ч After aging at 325 °C, 4 hours	283,2	325,4	0,18

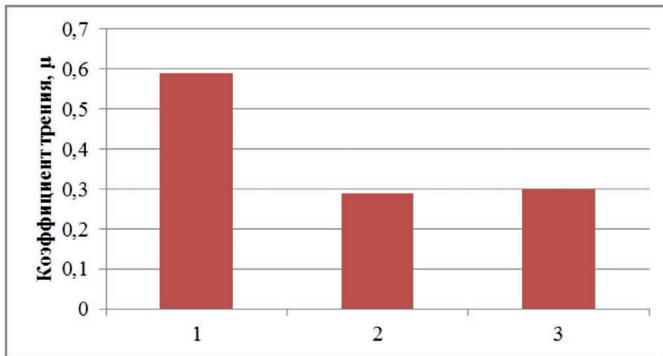


Рис. 5. Значения коэффициента трения:

1 – BrO10H5; 2 – BrC10O10H5; 3 – BrC10O10H5 после старения при 325 °С, 4 ч

Fig. 5. The values of the friction coefficient of bronze:

1 – Cu-10Sn-5Ni; 2 – Cu-10Pb-10Sn-5Ni; 3 – Cu-10Pb-10Sn-5Ni after aging at 325 °C, 4 hours

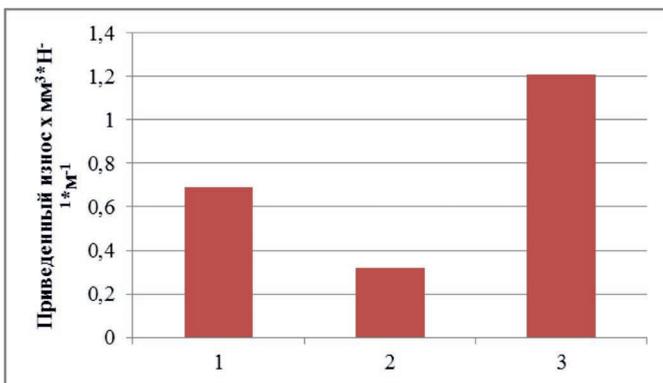


Рис. 6. Приведенный износ бронзы:

1 – BrC10O10H5; 2 – BrC10O10H5 после старения при 325 °С, 4 ч; 3 – BrO10H5

Fig. 6. Wear resistance of bronze:

1 – Cu-10Pb-10Sn-5Ni; 2 – Cu-10Pb-10Sn-5Ni after aging at 325 °C, 4 hours; 3 – bronze Cu-10Sn-5Ni

При сравнении коэффициентов трения бронзы со свинцом (BrC10O10H5) и без свинца (BrO10H5) было определено, что свинец в составе бронзы снижает коэффициент трения в два раза (рис. 5). Термическая обработка не оказала существенного влияния на коэффициент трения бронзы BrC10O10H5.

На рис. 6 показаны значения приведенного износа образцов из бронз.

Износостойкость бронзы со свинцом после термической обработки в два раза выше, чем у бронзы до термической обработки, и в пять раз выше, чем у бронзы без свинцовых включений (см. рис. 6).

## Выводы

Результаты проведенных исследований литой бронзы BrC10O10H5 после старения позволяют сделать следующие выводы.

1. Твердость достигает максимального значения 138НВ при температуре старения 325 °С и времени выдержки 4 ч. Увеличение твердости сплава обусловлено образованием интерметаллидных дисперсных частиц.

2. Прочностные характеристики после старения выше, чем в литом состоянии. Предел текучести увеличивается на 10 %, предел прочности – на 24 %.

3. Износостойкость литой в металлическую форму бронзы BrC10O10H5 повышается в два раза после проведения старения.

4. Легирование никелем свинцово-оловянистой бронзы, отлитой в металлическую форму, позволяет старением повысить эксплуатационные свойства.

## Список литературы

1. Измайлов В.А., Ермолаева Н.И., Токарь В.С. Роль поведения свинца при литье и деформации слитков ЛС 58–2 // Цветные металлы. – 1995. – № 7. – С. 63–66.
2. Ильин А.И. Повышение износостойкости и усталостной прочности некоторых антифрикционных сплавов // Исследование сплавов цветных металлов. – М.: Изд-во АН СССР, 1955. – С. 42–53.
3. Tin and nickel influence on the structure and properties of the leaded bronze obtained by centrifugal casting / N.S. Klochkov, U.P. Egorov, C. Mapelli, I.K. Zabrodina // Materials Science Forum. – 2016. – Vol. 870. – P. 248–252. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.870.248.
4. Мальцев М.В. Металлография промышленных цветных металлов и сплавов. – М.: Metallurgia, 1970. – 364 с.
5. Захаров А.М. Промышленные сплавы цветных металлов. Фазовый состав и структурные составляющие. – М.: Metallurgia, 1980. – 256 с.
6. Zhang S., Jiang B., Ding W. Dry sliding wear of Cu-15Ni-8Sn alloy // Tribology International. – 2010. – Vol. 43 (1–2). – P. 64–68. – DOI: 10.1016/j.triboint.2009.04.038.
7. Zhao J.C., Notis M.R. Spinodal decomposition, ordering transformation, and discontinuous precipitation in a Cu-15Ni-8Sn alloy // Acta Metallurgica. – 1998. – Vol. 46, iss. 12. – P. 4203–4218. – DOI: 10.1016/S1359-6454(98)00095-0.

8. *Schwartz L.H., Plewes J.T.* Spinodal decomposition in a Cu-9wt% Ni-6 wt% Sn-II. A critical examination of mechanical strength of spinodal alloys // *Acta Metallurgica*. – 1974. – Vol. 22, iss. 7. – P. 911–921. – DOI: 10.1016/0001-6160(74)90058-3.

9. *Kato M., Schwartz L.H.* The temperature dependence of yield stress and work hardening in spinodally decomposed Cu-10Ni-6Sn alloy // *Materials Science and Engineering*. – 1979. – Vol. 41, iss. 1. – P. 137–142.

10. *Cribb W.R., Ratka J.O.* Copper spinodal alloys // *Advanced Materials & Processes*. – 2002. – Vol. 160, iss. 11. – P. 1–4.

11. *Sadi F., Servant C.* Phase transformations and phase diagram at equilibrium in the Cu-Ni-Sn system // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. – 2007. – Vol. 90 (2). – P. 319–323. – DOI: 10.1007/s10973-007-8347-6.

12. Microstructural effects on tension behavior of Cu-15Ni-8Sn sheet / *J. Caris, D. Li, J. Stephens Jr, J. Lewandowski* // *Materials Science and Engineering A*. – 2010. – Vol. 527, iss. 3. – P. 769–781. – DOI: 10.1016/j.msea.2009.08.049.

13. *Virtanen P., Tiainen T., Lepisto T.* Precipitation at faceting grain boundaries of Cu-Ni-Sn alloys // *Materials Science and Engineering A*. – 1998. – Vol. 251, iss. 1–2. – P. 269–275. – DOI: 10.1016/S0921-5093(98)00498-5.

14. *Zhang S.Z., Jiang B.H., Ding W.J.* Wear of Cu-15Ni-8Sn spinodal alloy // *Wear*. – 2008. –

Vol. 264, iss. 3–4. – P. 199–203. – DOI: 10.1016/j.wear.2007.03.003.

15. Initial stages of decomposition in Cu-9Ni-6Sn / *E.G. Baburaj, U.D. Kulkarni, E.S.K. Menon, R. Krishnan* // *Journal of Applied Crystallography*. – 1979. – Vol. 12, iss. 5. – P. 476–480. – DOI: 10.1107/S0021889879013066.

16. *Gupta K.P.* An expanded Cu-Ni-Sn system (copper-nickel-zinc) // *Journal of Phase Equilibria*. – 2000. – Vol. 21 (5). – P. 479–484.

17. *Пресняков А.А., Новиков А.В.* Изучение механических свойств оловянистых бронз с добавками цинка, фосфора, свинца и никеля // *Труды Института ядерной физики АН КазССР*. – Алма-Ата, 1959. – Т. 2. – С. 41–73.

18. *Лакисов П.А.* Повышение качества отливок из оловянных бронз // *Фасонное литье медных сплавов*. – М.: Машгиз, 1957. – С. 44–51.

19. *Семенов К.Г., Колосков В.Ф., Чурсин В.М.* Разработка технологии производства качественных отливок из чушковых оловянных бронз // *Литейное производство*. – 1994. – № 7. – С. 10–11.

20. *Левашов Е.А.* Обеспечение единства измерений физико-механических и трибологических свойств наноструктурированных поверхностей [Электронный ресурс]. – URL: [http://www.nanometer.ru/2009/02/11/nanometrologia\\_58090.html](http://www.nanometer.ru/2009/02/11/nanometrologia_58090.html) (дата обращения: 13.05.2019).

## Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2019 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



## Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: [http://journals.nstu.ru/obrabotka\\_metallov](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)



### The Structure and Properties of the Alloy Cu-10Pb-10Sn-5Ni after Heat Treatment

Nikolai Klochkov<sup>1, a, \*</sup>, Yuri Egorov<sup>1, b</sup>, Oleg Utiev<sup>1, c</sup>, Silvia Barella<sup>2, d</sup>

<sup>1</sup> National Research Tomsk Polytechnic University, 30 Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation

<sup>2</sup> Polytechnic University of Milan, 32 Piazza Leonardo da Vinci, Milan, 20133, Italy

<sup>a</sup> <https://orcid.org/0000-0003-3763-5117>, [nikart2012@gmail.com](mailto:nikart2012@gmail.com), <sup>b</sup> <https://orcid.org/0000-0001-8929-5623>, [yuri.egorovv@yandex.ru](mailto:yuri.egorovv@yandex.ru),

<sup>c</sup> <https://orcid.org/0000-0001-7712-3859>, [utievv@mail.ru](mailto:utievv@mail.ru), <sup>d</sup> <https://orcid.org/0000-0002-1866-6674>, [silvia.barella@polimi.it](mailto:silvia.barella@polimi.it)

#### ARTICLE INFO

##### Article history:

Received: 23 March 2019

Revised: 03 April 2019

Accepted: 07 May 2019

Available online: 15 June 2019

##### Keywords:

Heat treatment

Lead bronze

Mechanical properties

Tribotechnical characteristics

#### ABSTRACT

**Introduction.** Lead-tin bronzes are among the most demanded materials for manufacturing parts operating under friction and wear conditions. In the majority of cases, in addition to high antifriction properties the parts should have augmented strength. However, the inclusions of lead in this material considerably decline the strength, which leads to premature failure. Despite the existing profusion of methods to improve the strength of lead-tin bronzes, some of them are hardly applicable and instable on industrial scale, while others are still experimental. Thus, the search for the techniques to increase the strength of lead-containing bronzes remains high on the agenda. **The purpose of the work:** studying the structure, mechanical and tribological properties of Cu-10Pb-10Sn-5Ni alloy after heat treatment on the example of Cu-10Pb-10Sn-5Ni bronze. The alloy is obtained by melting materials in a high-frequency thyristor installation in a crucible made of siliconized graphite with subsequent pouring into a metal mold. The samples are aged at a temperature of 300–500 °C. **The methods of investigation.** Mechanical tests for static tension and tribotechnical tests, as well as spectral analysis of the chemical composition and metallographic investigations of nickel-doped lead-tin bronze are used. **Results and Discussion.** It is common knowledge that one of the ways to change the structure and mechanical properties of a material is heat treatment, which results in the formation of a special structure due to the dispersive decomposition after quenching and aging. The formation of the ordered structures during aging maximizes the hardness. It is found that the maximum value of hardness (138HB) for Cu-10Pb-10Sn-5Ni bronze is achieved by aging at the temperature of 325 °C for 4 hours. Aging also improves the mechanical characteristics of the samples: yield stress by 10% and tensile strength by 24%. The averaged results of the energy dispersive X-ray spectrometric analysis (EDS) of the selected phase indicate that the enlarged dispersion particles are a ternary chemical compound, presumably, Cu<sub>9</sub>NiSn<sub>3</sub>. The tribotechnical characteristics of the bronze before and after aging are investigated. It is determined that lead in bronze halves the friction coefficient. The heat treatment had no significant effect on the friction coefficient of Cu-10Pb-10Sn-5Ni bronze. The wear resistance of the bronze with lead after heat treatment is two times higher than that of the bronze before heat treatment, and five times higher than that of the bronze without lead inclusions. The presented results demonstrate the capabilities of thermal treatment in the enhancement of the strength and wear-resistance of nickel-doped lead-tin bronze.

**For citation:** Klochkov N.S., Egorov U.P., Utiev O.M., Barella S. The structure and properties of the alloy Cu-10Pb-10Sn-5Ni after heat treatment. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2019, vol. 21, no. 2, pp. 145–153. DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.2-145-153. (In Russian).

#### References

1. Izmailov V.A., Ermolaeva N.I., Tokar' V.S. Rol' povedeniya svintsa pri lit'e i deformatsii slitkov LS 58–2 [The role of lead behavior during casting and deformation of ingots LS 58–2]. *Tsvetnye metally = Non-ferrous metals*, 1995, no. 7, pp. 63–66.

#### \* Corresponding author

Klochkov Nikolai S., Ph.D. (Engineering) student  
National Research Tomsk Polytechnic University,  
30 Lenin Avenue,

Tomsk, 634050, Russian Federation

Tel.: 8 (382) 270-17-17, e-mail: [nikart2012@gmail.com](mailto:nikart2012@gmail.com)

2. Il'in A.I. Povyshenie iznosostoikosti i ustalostnoi prochnosti nekotorykh antifriktsionnykh splavov [The increased wear resistance and fatigue strength of some antifriction alloys]. *Issledovanie splavov tsvetnykh metallov* [Research of alloys of non-ferrous metals]. Moscow, AN SSSR Publ., 1955, pp. 42–53.

3. Klochkov N.S., Egorov U.P., Mapelli C., Zabrodina I.K. Tin and nickel influence on the structure and properties of the leaded bronze obtained by centrifugal casting. *Materials Science Forum*, 2016, vol. 870, pp. 248–252. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.870.248.

4. Mal'tsev M.V. *Metallografiya promyshlennykh tsvetnykh metallov i splavov* [Metallography of industrial non-ferrous metals and alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1970. 364 p.

5. Zakharov A.M. *Promyshlennyye splavy tsvetnykh metallov. Fazovyi sostav i strukturnye sostavlyayushchie* [Industrial alloys of non-ferrous metals. Phase composition and structural components]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1980. 256 p.

6. Zhang S., Jiang B., Ding W. Dry sliding wear of Cu-15Ni-8Sn alloy. *Tribology International*, 2010, vol. 43, iss. 1–2, pp. 64–68. DOI: 10.1016/j.triboint.2009.04.038.

7. Zhao J.C., Notis M.R. Spinodal decomposition, ordering transformation, and discontinuous precipitation in a Cu-15Ni-8Sn alloy. *Acta Metallurgica*, 1998, vol. 46, iss. 12, pp. 4203–4218. DOI: 10.1016/S1359-6454(98)00095-0.

8. Schwartz L.H., Plewes J.T. Spinodal decomposition in a Cu-9wt% Ni-6 wt% Sn-II. A critical examination of mechanical strength of spinodal alloys. *Acta Metallurgica*, 1974, vol. 22, iss. 7, pp. 911–921. DOI: 10.1016/0001-6160(74)90058-3.

9. Kato M., Schwartz L.H. The temperature dependence of yield stress and work hardening in spinodally decomposed Cu-10Ni-6Sn alloy. *Materials Science and Engineering*, 1979, vol. 41, iss. 1, pp. 137–142.

10. Cribb W.R., Ratka J.O. Copper spinodal alloys. *Advanced Materials & Processes*, 2002, vol. 160, iss. 11, pp. 1–4.

11. Sadi F., Servant C. Phase transformations and phase diagram at equilibrium in the Cu-Ni-Sn system. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2007, vol. 90 (2), pp. 319–323. DOI: 10.1007/s10973-007-8347-6.

12. Caris J., Li D., Stephens Jr. J., Lewandowski J. Microstructural effects on tension behavior of Cu-15Ni-8Sn sheet. *Materials Science and Engineering A*, 2010, vol. 527, iss. 3, pp. 769–781. DOI: 10.1016/j.msea.2009.08.049.

13. Virtanen P., Tiainen T., Lepisto T. Precipitation at faceting grain boundaries of Cu-Ni-Sn alloys. *Materials Science and Engineering A*, 1998, vol. 251, iss. 1–2, pp. 269–275. DOI: 10.1016/S0921-5093(98)00498-5.

14. Zhang S.Z., Jiang B.H., Ding W.J. Wear of Cu-15Ni-8Sn spinodal alloy. *Wear*, 2008, vol. 264, iss. 3–4, pp. 199–203. DOI: 10.1016/j.wear.2007.03.003.

15. Baburaj E.G., Kulkarni U.D., Menon E.S.K., Krishnan R. Initial stages of decomposition in Cu-9Ni-6Sn. *Journal of Applied Crystallography*, 1979, vol. 12, iss. 5, pp. 476–480. DOI: 10.1107/S0021889879013066.

16. Gupta K.P. An expanded Cu-Ni-Sn system (copper-nickel-zinc). *Journal of Phase Equilibria*, 2000, vol. 21 (5), pp. 479–484.

17. Presnyakov A.A., Novikov A.V. [The study of the mechanical properties of tin bronze with the addition of zinc, phosphorus, lead and nickel]. *Trudy Instituta yadernoi fiziki AN KazSSR* [Proceedings of the Institute of Nuclear Physics of the Academy of Sciences of the Kazakh SSR], 1959, vol. 2, pp. 41–73. (In Russian).

18. Lakisov P.A. Povyshenie kachestva otlivok iz olovyannykh bronz [Improving the quality of tin bronze castings]. *Fasonnoe lit'e mednykh splavov* [Shaped casting of copper alloys]. Moscow, Mashgiz Publ., 1957, pp. 44–51.

19. Semenov K.G., Koloskov V.F., Chursin V.M. Razrabotka tekhnologii proizvodstva kachestvennykh otlivok iz chushkovykh olovyannykh bronz [Development of technology for the production of high-quality castings from pig tin bronze]. *Liteinoe proizvodstvo = Foundry. Technologies and Equipment*, 1994, no. 7, pp. 10–11.

20. Levashov E.A. *Obespechenie edinstva izmerenii fiziko-mekhanicheskikh i tribologicheskikh svoystv nanostrukturirovannykh poverkhnostei* [Ensuring the uniformity of measurements of physicochemical and tribological properties of nanostructured surfaces]. Available at: [http://www.nanometer.ru/2009/02/11/nanometrologia\\_58090.html](http://www.nanometer.ru/2009/02/11/nanometrologia_58090.html) (accessed 13.05.2019).

## Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2019 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).