

УДК 691.73:669.35

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.051125.132.1200

АНАЛІЗ НОРМАТИВНИХ ВИМОГ ТА ДІАГРАМ ФАЗОВИХ РІВНОВАГ БРОНЗ СИСТЕМИ Cu–Sn–Si

УЗЛОВ К. І.^{1*}, докт. техн. наук, проф.,
СОЛОНЕНКО Л. І.², докт. техн. наук, доц.,
ВОРОНКО Ю. С.³, асп.,
БІЛИЙ А. П.⁴, асп.,
КІМСТАЧ Т. В.⁵, канд. техн. наук, доц.

^{1*} Кафедра матеріалознавства та термічної обробки металів, Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпро, Україна, тел. + 38 (067) 950-14-08, e-mail: konst.uzlov@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-0744-9890

² Кафедра цивільної безпеки та охорони праці, Національний університет «Одеська політехніка», пр. Шевченка, 1, 65044, Одеса, Україна, тел. +38 (093) 123-81-40, e-mail: li.solonenko@op.edu.ua, ORCID ID: 0000-0003-2092-8044

³ Кафедра матеріалознавства та термічної обробки металів, Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпро, Україна, тел. + 38 (050) 346-31-10, e-mail: ingenpismnet@gmail.com, ORCID ID: 0009-0003-6410-6509

⁴ Кафедра ливарного виробництва, Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпро, Україна, тел. + 38 (093) 395-23-72, e-mail: 777bap777@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-2905-7046

⁵ Кафедра матеріалознавства та термічної обробки металів, Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпро, Україна; відділ проблем деформаційно-термічної обробки конструкційних сталей, Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, пл. Академіка Стародубова, 1, 49107, Дніпро, Україна, тел. +38 (097) 567-85-61, e-mail: 1375tatvana@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-8993-201X

Анотація. Бронзи, завдяки своїм властивостям, з кожним роком знаходять дедалі широкое застосування в різних галузях промисловості. У зв'язку з ускладненням умов експлуатації технічних пристроїв та зростанням вимог до довговічності й надійності матеріалів, постає необхідність використання бронз з розширеним числом преференційних властивостей. Вирішення цієї задачі, де результатом стане поєднання бажаних рівнів показників механічних, технологічних та експлуатаційних властивостей в одному мідь-олов'яному сплаві треба шукати в напрямку розробки нових систем їх легування. Представлені дані свідчать про те, що бронзи системи Cu–Sn–Si можуть поєднувати в собі найкращі властивості, притаманні як олов'яним, так і кремнієвим бронзам. Це робить їх перспективними для застосувань, де важливі високі механічні характеристики, корозійна стійкість, хороша оброблюваність і формуваність. Однак олов'яно-кремнієві бронзи не є достатньо дослідженими і не є нормативно забезпеченими. З цієї причини, олов'яно-кремнієві бронзи не мають широкого промислового розповсюдження і, як наслідок, не користуються гідною дослідницькою увагою. Виходячи з викладеного, робота, яка присвячена встановленню закономірностей фазових перетворень і структуроутворення у бронзах системи Cu–Sn–Si з різним вмістом кремнію й олова є актуальною. **Мета дослідження.** Встановлення закономірностей фазових перетворень і структуроутворення у бронзах системи Cu–Sn–Si з різним вмістом кремнію й олова. **Методика дослідження.** У роботі проводили аналіз ливарних олов'яних бронз за ASTM B505 та EN 1982. Зразки для досліджень (Ø16×100 мм) виготовляли шляхом заливання розплаву бронзи піщану ливарну форму. Для виготовлення бронз використовували вихідні шихтові матеріали технічної чистоти. Плавку проводили в індукційній печі з графітовим тиглем під шаром деревного вугілля. Хімічний склад бронз визначали на приборі EXPERT 4L. Мікроструктурні дослідження проводили на шліфах, виготовлених стандартними методами відповідно до вимог ASTM E3-11(2017) «Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens». Структуру вивчали за допомогою оптичного мікроскопа NEOPHOT 21 зі збільшенням від 100 до 1000. **Висновки.** Металографічними дослідженнями структуроутворення сплавів трикомпонентної системи Cu–Sn–Si встановлені закономірності фазових перетворень сплавів мідного куту її конодного трикутника. Отримали подальший розвиток уявлення про ефект легування олов'яної бронзи кремнієм.

Ключові слова: бронза; діаграми фазових рівноваг; закономірності фазових перетворень; мікроструктура

ANALYSIS OF REGULATORY REQUIREMENTS AND PHASE EQUILIBRIUM DIAGRAMS OF BRONZES OF THE Cu–Sn–Si SYSTEM

UZLOV K.I.^{1*}, Dr. Sc. (Tech.), Prof.,
SOLOVENKO L.I.², Dr. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.,

VORONKO Yu.S.³, *Postgrad. Stud.*,
BILYI A.P.⁴, *Postgrad. Stud.*,
KIMSTACH T.V.⁵, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*

^{1*} Department of Material Science and Heat Treatment of Metals, Ukrainian State University of Science and Technologies, 2, str. Lazaryana, Dnipro, 49010, Ukraine, tel. + 38 (067) 950-14-08, e-mail: konst.uzlov@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-0744-9890

² Department of Civil Safety and Occupational Safety and Health, Odessa Polytechnic National University, 1, Shevchenko av., Odesa, 65044, Ukraine, tel. +38 (093) 123-81-40, e-mail: li.solonenko@op.edu.ua, ORCID ID: 0000-0003-2092-8044

³ Department of Material Science and Heat Treatment of Metals, Ukrainian State University of Science and Technologies, 2, str. Lazaryana, Dnipro, 49010, Ukraine, tel. + 38 (050) 346-31-10, e-mail: ingenpisemnet@gmail.com, ORCID ID: 0009-0003-6410-6509

⁴ Department of Casting Production, Ukrainian State University of Science and Technologies, 2, str. Lazaryana, Dnipro, 49010, Ukraine, tel. + 38 (093) 395-23-72, e-mail: 777bap777@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-2905-7046

⁵ Department of Material Science and Heat Treatment of Metals, Ukrainian State University of Science and Technologies, 2, Lazaryana St., Dnipro, 49010, Ukraine; Department of Problems of Deformation and Thermal Treatment of Structural Steel, Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov of National Academy of Science of Ukraine, 1, Ak. Starodubov K.F. Sq., Dnipro, 49107, Ukraine, tel. +38 (097) 567-85-61, e-mail: 1375atyana@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-8993-201X

Abstract. Bronzes, due to their properties, are increasingly widely used in various industries every year. Due to the complexity of the operating conditions of technical devices and the growing requirements for the durability and reliability of materials, there is a need to use bronzes with an expanded number of preferential properties. The solution to this problem, where the result will be a combination of the desired levels of mechanical, technological and operational properties in one copper-tin alloy, should be sought in the direction of developing new systems for their alloying. The presented data indicate that bronzes of the Cu–Sn–Si system can combine the best properties inherent in both tin and silicon bronzes. This makes them promising for applications where high mechanical characteristics, corrosion resistance, good machinability and formability are important. However, tin-silicon bronzes have not been sufficiently studied and are not provided for by regulations. For this reason, tin-silicon bronzes do not have wide industrial distribution and, as a result, do not receive due research attention. Based on the above, the work devoted to establishing the regularities of phase transformations and structure formation in bronzes of the Cu–Sn–Si system with different silicon and tin contents is relevant. **Purpose of the study** Establishing the regularities of phase transformations and structure formation in bronzes of the Cu–Sn–Si system with different silicon and tin contents. **Research methodology.** The work analyzed foundry tin bronzes according to ASTM B505 and EN 1982. Samples for research (Ø16×100 mm) were made by pouring molten bronze into a sand casting mold. The initial charge materials of technical purity were used to manufacture the bronzes. Melting was carried out in an induction furnace with a graphite crucible under a layer of charcoal. The chemical composition of the bronzes was determined on the EXPERT 4L instrument. Microstructural studies were carried out on sections prepared by standard methods in accordance with the requirements of ASTM E3-11(2017) “Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens”. The structure was studied using a NEOPHOT 21 optical microscope with a magnification of 100 to 1000. **Conclusions.** Metallographic studies of the structure formation of alloys of the ternary system Cu–Sn–Si established the regularities of phase transformations of alloys of the copper corner of its conoid triangle. We received further development of the idea of the effect of doping tin bronze with silicon.

Keywords: bronze; phase equilibrium diagrams; phase transformation patterns; microstructure

Вступ. Бронзи, завдяки своїм властивостям, таким як висока міцність, електрична та теплопровідність, корозійна стійкість у морській воді, водяній парі, на повітрі та в інших хімічно активних середовищах, а також високим триботехнічним властивостям, з кожним роком знаходять дедалі широкі застосування в таких галузях, як електротехніка, енергетичне машинобудування, суднобудування, автомобіле- та приладобудування, авіаційна промисловість, будівництво тощо.

У зв'язку з ускладненням умов експлуатації технічних пристроїв та зростанням вимог до довговічності й

надійності матеріалів, постає необхідність удосконалення властивостей бронзових сплавів. Це вимагає комплексного підходу, що включає оптимізацію хімічного складу існуючих сплавів, застосування додаткового легування, модифікації та вдосконалення технологій виготовлення деталей. Такі заходи сприяють підвищенню ефективності та надійності технічних пристроїв, в яких використовують бронзові сплави, та відповідають зростаючим вимогам сучасної техніки та промисловості.

Актуальність. На сьогодні найбільш поширеними мідними сплавами є бронзи системи Cu–Sn [1], які широко застосовуються для виготовлення арматури загального

призначення, в тому числі елементів тертя, фасонних частин трубопровідних систем, високонавантажених компонентів шнекових приводів, натискних і шпindelних гайок, вінців черв'ячних коліс, деталей, що експлуатуються в умовах гідродинамічного змащення тощо [2; 3].

Технологічні, механічні та експлуатаційні властивості олов'яних бронз залежать як від вмісту в них олова так і умов лиття [4]. Зокрема, при литті в піщані форми, з підвищенням вмісту олова в бронзі спостерігається зростання її міцності та твердості при одночасному зменшенні подовження. В той же час, при литті під тиском в металеві прес-форми підвищення вмісту олова до 4 мас. % призводить до збільшення подовження бронзи, тоді як при вмісті олова в бронзі понад 4 мас. % спостерігається його зниження. Ударна в'язкість сплавів системи Cu-Sn зростає при вмісті олова до 5 мас. % Sn, однак при вищих значеннях вмісту олова (понад 5 мас. %) спостерігається її зниження. При цьому, міцність на розтяг олов'яних бронз збільшується зі зростанням вмісту олова до 10 мас. %, а твердість бронз має лінійну залежність від вмісту в них олова [5–7].

В цілому, олов'яні бронзи при задовільній міцності мають високі показники корозійної стійкості, антифрикційних властивостей. Олов'яним бронзам притаманні низький коефіцієнт тертя, високий опір зносу, низька чутливість до корозії під напругою. З точки зору ливарних властивостей, олов'яні бронзи характеризуються невисокою рідкоплинністю великий інтервал кристалізації, який, наприклад для бронзи з 4...6 мас. % олова складає 150...200 °C [3]. Саме з великим інтервалом кристалізації Осінцев О. Е. (2004) пов'язує схильність виливків з олов'яних бронз до виникнення розосередженої усадкової пористості по їх об'єму.

В числі основних легувальних елементів стандартизованих олов'яних бронз – фосфор, цинк, свинець та нікель.

Фосфор – ефективний розкислювач, який при відносно невеликому вмісті підвищує міцність, твердість, зносостійкість та

рідкоплинність бронз, але знижує їх пластичність.

Цинк знижує схильність бронз до ліквації, підвищує їх міцність і рідкоплинність, сприяє отриманню лиття з більшою щільністю, що надає литим деталям більшої герметичності.

Свинець підвищує триботехнічні властивості, рідкоплинність і щільність бронз, полегшує обробку різанням.

Нікель подрібнює зерно, підвищує міцність, пластичність та деформованість бронз, підвищує корозійну стійкість, щільність, зменшує ліквацію в литих бронзах [3; 8].

Крім легуючих компонентів всі бронзи технічної чистоти, як і будь які інші сплави, характеризуються наявністю в них певної кількості небажаних домішок. Показники кількості та складу небажаних домішок в кожній марці бронзи індивідуально зазначено у відповідній нормативно-технічній документації і, в ряді випадків, вони можуть бути скореговані за домовленістю між виробником та “Замовником” бронзових виробів.

Зазвичай в олов'яних бронзах в числі небажаних домішок є більше 0,05 мас. % Al, 0,4 мас. % Fe, 0,05% мас. Si, 0,5 мас. % Sb, 0,5 мас. % Pb та 0,1 мас. % P, вплив яких на властивості олов'яних бронз носить різновекторний характер [9]. Відносно небажаних домішок у бронзах Курдюмов А. В. (1982) зазначає, що з усіх домішок, які присутні у бронзах, найбільш негативний вплив на властивості олов'яних бронз мають алюміній та кремній. Такий погляд на присутність в олов'яних бронзах, зокрема, кремнію зумовлений його негативним впливом на рівень властивостей цих бронз – властивостей, які вважалися преференційними на час розробки цих сплавів, що і обумовило жорстке нормативне обмеження кількості кремнію в олов'яних бронзах.

Сучасний бурхливий розвиток техніки потребує використання бронз з розширеним числом преференційних властивостей. Вирішення цієї задачі, де результатом стане поєднання бажаних рівнів показників механічних, технологічних та експлуатаційних властивостей в одному

мідь-олов'яному сплаві треба шукати в напрямку розробки нових систем їх легування. Зокрема, незважаючи на відсутність окремих стандартів для бронз системи Cu–Sn–Si, існують перспективи для розробки таких сплавів [4; 10; 11].

В роботі [4], показано що мікролегування сплаву CuSn10 0,04 % мас. Si сприяє підвищенню його плинності та герметичності виливків, робить цей сплав більш придатним для застосування у відповідальних конструкціях, де важлива висока щільність та якість поверхні. За даними Комкова В.Г (2013), збільшення вмісту Si до 5,0 мас % різко підвищує твердість олов'яної бронзи, що пояснюється збільшенням в структурі бронзи частки легованого кремнієм олов'яного евтектоїду з високою (3200...3500 МПа) мікротвердістю. При цьому, вплив Si на теплопровідність бронзи є аналогічним впливу Al.

Авторами роботи [11], розроблено бронзу, яка демонструє значне перевищення показників міцності та ударної в'язкості порівняно з традиційною дзвоною бронзою, зокрема у 1,5...2,5 рази, при збереженні або навіть підвищенні відносного видовження та має збільшену тривалість звучання. Розроблена бронза має вміст олова у 3,6...10 разів менший за традиційну дзвонову бронзу та додатково легована 4,5...5,5 мас. % Si.

В роботі [12] досліджено вплив вмісту олова в межах 0,1...1,5 мас. % на структуру, механічні та фізичні властивості кремнієвої бронзи Cu–3%Si. Отримані результати свідчать про те, що з підвищенням вмісту олова в сплаві спостерігається зростання границі міцності на розтяг, твердості та електричного опору. Водночас, відносне подовження та електропровідність зменшуються з підвищенням вмісту олова.

Представлені дані свідчать про те, що бронзи системи Cu–Sn–Si можуть поєднувати в собі найкращі властивості, притаманні як олов'яним, так і кремнієвим бронзам. Це робить їх перспективними для застосувань, де важливі високі механічні характеристики, корозійна стійкість, хороша оброблюваність і формуваність. Однак, як

свідчать представлені дані, олов'яно-кремнієві бронзи не є достатньо дослідженими і не є нормативно забезпеченими. З цієї причини, олов'яно-кремнієві бронзи не мають широкого промислового розповсюдження і, як наслідок, не користуються гідною дослідницькою увагою. Виходячи з викладеного, робота, яка присвячена встановленню закономірностей фазових перетворень і структуроутворення у бронзах системи Cu–Sn–Si з різним вмістом кремнію й олова є актуальною.

Мета дослідження. Встановлення закономірностей фазових перетворень і структуроутворення у бронзах системи Cu–Sn–Si з різним вмістом кремнію й олова.

Методика дослідження. У роботі проводили аналіз ливарних олов'яних бронз за ASTM B505 та EN 1982.

Зразки для досліджень ($\varnothing 16 \times 100$ мм) виготовляли шляхом заливання розплаву бронзи піщану ливарну форму. Для виготовлення бронз використовували вихідні шихтові матеріали технічної чистоти. Плавку проводили в індукційній печі з графітовим тиглем під шаром деревного вугілля. Хімічний склад бронз визначали на приборі EXPERT 4L.

Мікроструктурні дослідження проводили на шліфах, виготовлених стандартними методами відповідно до вимог ASTM E3-11(2017) «Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens». Хімічне травлення здійснювали у розчині $3,5 \text{ г FeCl}_3 + 25 \text{ мл HCl} + 75 \text{ мл C}_2\text{H}_5\text{OH}$ за режимами наданими в роботі Беккерт М. (1988). Структуру вивчали за допомогою оптичного мікроскопа NEOPHOT 21 зі збільшенням від 100 до 1000.

Результати досліджень. Через нормативно-індустріальне обмеження авторам наявної роботи у відкритих довідкових джерелах трикомпонентну діаграму стану системи мідь-олово-кремній знайти не вдалось. Тому, у цих дослідженнях оцінка закономірностей структуроутворення сплавів трикомпонентної системи Cu–Sn–Si здійснювалась на підставі результатів власного мікроструктурного аналізу за вимогами ASTM E3-11(2017).

У ході ідентифікації мікроструктур сплавів системи Cu–Sn–Si автори виходили із теоретичних положень, які закономірно

впливають із аналізу подвійних діаграм Cu–Si (рис. 1, а) та Cu–Sn (рис. 1, б) [13; 14].

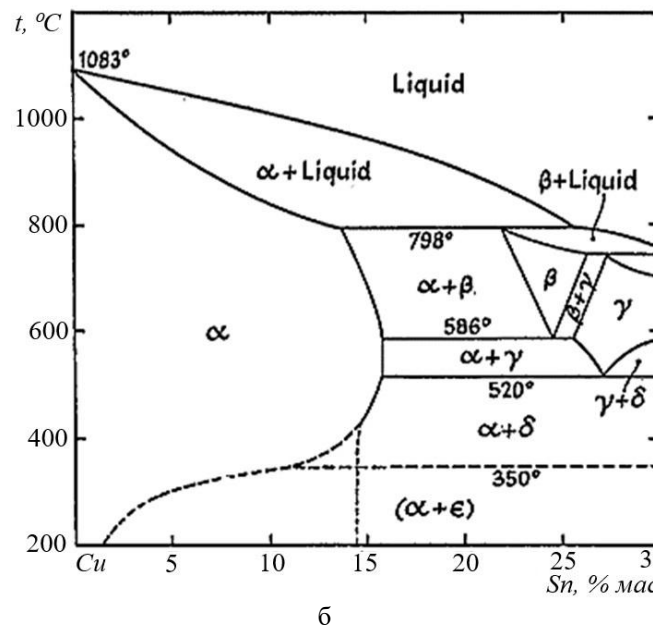
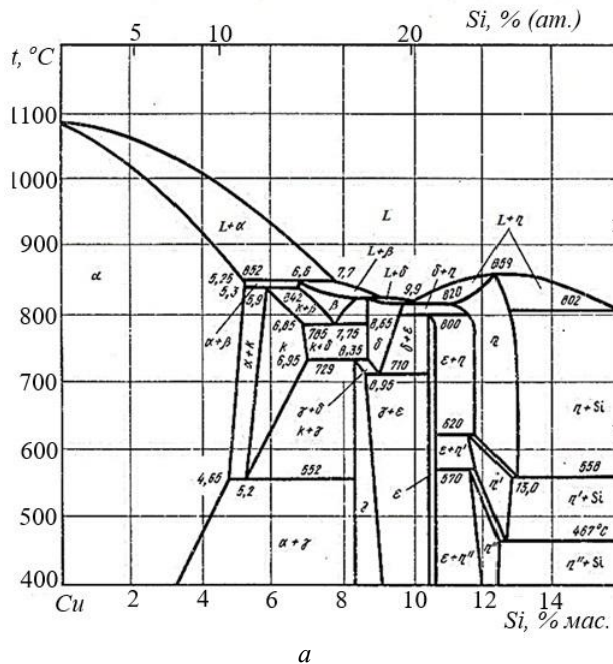


Рис. 1. Мідний кут діаграми фазових рівноваг систем Cu–Si (а) та Cu–Sn (б) [13; 14]

У мідному куту обох діаграм ($T_{\text{пл. Cu}} = 1084^\circ\text{C}$), після кристалізації первинних дендритів α -Cu, першим здійснюється перитектичне перетворення $L + \alpha\text{-Cu} \rightarrow \beta$. Температури перитектичної рівноваги у системі Cu–Sn – 798°C , а в системі Cu–Si (за даними різних авторів) – $852\ldots 785^\circ\text{C}$, тобто, практично однакові. Із цього випливає висновок про те, що поверхня ліквідус в мідному куту потрібної системи Cu–Si–Sn є суцільно спільною між осями Cu–Si та Cu–Sn. Під нею розміщується двофазна просторова область $L + \alpha$. Склад рідкої фази закономірно залежить від концентрації компонентів у сплавах. Далі при охолодженні відбувається перитектична реакція $L + \alpha\text{-Cu} \rightarrow \beta$. Склад β -фази, очевидно, залежить від складів вихідних фаз, в першу чергу – рідкої. Важливим, в даному випадку є той факт, що в обох випадках β -фази є кристалографічно подібними – ОЦК ($\text{Im}\bar{3}\text{m}$) з майже однаковими параметрами решітки – $0,2981\text{ нм}$ у системі Cu–Sn та $0,2854\text{ нм}$ в системі Cu–Si (дані роботи Лякишева Н. П. (2001)).

Із викладеного випливає, що у потрібній системі Cu–Si–Sn продуктом перитектичної

реакції є β -фаза змінного, відповідно до сукупності компонентів у сплаві, хімічного складу. Цей факт знаходиться у повній відповідності до даних роботи Лебедева К. П. (1973).

Подальша кінетика евтектоїдних перетворень закономірно обумовлена ступенем легованості вихідної β -фази, на що вказано в роботі Комкова В. Г. (2013). Тобто, у кінцевій структурі бронзи закономірно очікувати формування евтектоїдної складової з різним ступенем легованості хімічної сполуки, що входить до її складу, або наявності різних проміжних фаз, або стабілізації при кімнатній температурі легованої високотемпературної фази β без перетворення, або, навіть, збереження одночасно продуктів двох перитектичних реакцій систем Cu–Sn та Cu–Si. Такі фази, щоб запобігти плутанини з раніш використаними позначеннями мартенситних фаз (дані роботи Ісайчева І (1939)), в наявній роботі умовно прийняті – $\beta_{(\text{Cu-Sn})}$ для системи Cu–Sn та $\beta_{(\text{Cu-Si})}$ для системи Cu–Si.

Через суттєву різницю температур плавлення міді ($T_{\text{пл. Cu}} = 1084^\circ\text{C}$) та олова ($T_{\text{пл. Sn}} = 231,9^\circ\text{C}$), дослідники трикомпонентно

ї системи Cu–Sn–Al [15; 16] наводять відомості про існування в олов'яній області діаграми протяжної ділянки купола незмішуваності двох рідких фаз L' та L'' з відповідною монотектичною рівновагою під ним. Виходячи із цього положення, в роботі [15] для сплаву з фіксованою концентрацією міді 10 мас. % наведені температури фазових рівноваг відповідного політермічного перерізу діаграми: лінія розшарування – 587 °C, монотектична горизонталь – 558 °C, евтектична рівновага за участю твердих фаз – 523,8 °C. Автори [16] наводять інформацію про високотемпературні перетворення сплавів системи Cu–Sn–Al на перших етапах тверднення. Першою при охолодженні відбувається реакція $L' \rightarrow L'' + \beta$ за температури 785 °C. За нею – $\beta + \gamma\text{CuSn} \rightarrow L' + \text{CuSn}$ за 642 °C. Зрозуміло, що неможливо однозначно транслювати ці закономірності на іншу діаграму системи Cu–Sn–Si, але факт первинної кристалізації твердої фази з рідини та подальшу кінетику кристалізації відповідно до трифазної реакції перетворення рідкої фази іншого складу до уваги прийняти корисно.

Металографічні дослідження сплавів системи Cu–Sn–Si із сумарним вмістом Sn+Si до 5 мас. % демонструють наявність однофазної структури трикомпонентних бронз (рис. 2, а) [11].

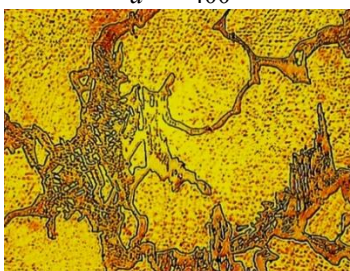
Перевищення вказаної концентрації призводить до втрачання сплавами системи Cu–Sn–Si однофазної структури і формування у сплавах крім первинних дендритів твердого розчину на основі міді ($\alpha\text{-Cu}^I$) ще і рівномірно розташованих частинок β -фази (рис. 2, б) та/або продуктів її твердофазного розпаду за евтектоїдним механізмом перетворення (рис. 2, в). В цьому випадку, принциповий вплив на кінцеву структуру має кількість кремнію у трикомпонентній композиції сплаву.

За результатами дослідження [11] встановлена тенденція до підвищення кількості продуктів евтектоїдного розпаду вихідної β -фази в бронзі при зростанні вмісту в сплавах олова. Водночас, у всіх випадках (рис. 2, в) зафіксована значна кількість залишкової вихідної β -фази. Тобто, твердофазні перетворення для сплавів системи Cu–Sn–Si відбуваються складно і не до повного завершення розпаду високотемпературної фази.

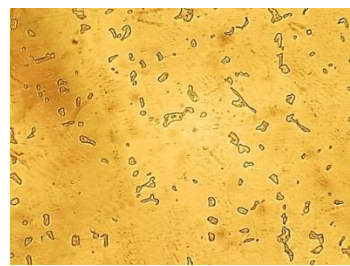
Інша кінетика структуроутворення спостерігається в сплавах системи Cu–Sn–Si з вмістом кремнію більше 4 мас. %. В даному випадку (див. рис 2, з) вихідна β -фаза стабілізується кремнієм і в твердому стані не підпорядковується низькотемпературним евтектоїдним перетворенням.



а – ×400



в – ×1 000



б – ×1 000



з – ×500

Рис. 2. Мікроструктура сплавів трикомпонентної системи Cu–Sn–Si зі співвідношенням компонентів Sn та Si: 0,649 мас. % Sn + 0,618 мас. % Si (а); 5,4 мас. % Sn + 1,9 мас. % Si (б); 4,044 мас. % Sn + 1,889 мас. % Si (в); 2,080 мас. % Sn + 4,950 мас. % Si (з)

Висновки

За результатами металографічних досліджень структур сплавів трикомпонентної системи Cu–Sn–Si встановлено:

– в сплавах системи Cu–Sn–Si із сумарним вмістом Sn+Si до 5 мас. % створюється однофазна α -Cu структура трикомпонентних бронз;

– перевищення сумарної концентрації Sn+Si в олов'яно-кремнієвій бронзі понад 5 мас. % призводить до формування у сплавах крім первинних дендритів твердого розчину на основі міді (α -Cu^I) ще і β -фази та/або продуктів її твердофазного розпаду;

– для сплавів з вмістом Si до 4 мас. % зафіксована тенденція до підвищення кількості продуктів евтектоїдного розпаду вихідної β -фази в бронзі при зростанні вмісту в сплавах олова;

– в сплавах системи Cu–Sn–Si з вмістом Si більше 4 мас. % вихідна β -фаза стабілізується кремнієм і в твердому стані не підпорядковується низькотемпературним евтектоїдним перетворенням при менші ніж 4 мас. % кількості олова в бронзі.

За даними результатів роботи отримали подальший розвиток уявлення про ефект легування олов'яної бронзи кремнієм. Зокрема, встановлено, що, при оптимальному співвідношенні компонентів в досліджених бронзах, кремній, як легуючий компонент високотемпературної β -фази, стабілізує її у метастабільній температурній області зі сталим подальшим стабільним існуванням, навіть після нормативного низькотемпературного відпалу виливків.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Liang Z., Jiang K., Zhang T. Electrochemical and passive behaviour of Cu–Sn bronze in simulated archaeological soil media. *Materials and Corrosion*. 2020. URL: <https://doi.org/10.1002/maco.202011894>
2. Tin Bronze AMPCO METAL. AMPCO METAL. URL: <https://www.ampcometal.com/products/standard-alloys/tin-bronze/> (date of access : 04.05.2025).
3. Грешта В. Л., Лисиця О. В., Степанова Л. П. Кольорові метали та сплави на їх основі : навч. посіб. Запоріжжя : ЗНТУ, 2014. 286 с.
4. Witasiaik D. et al. Effect of Alloying Additives and Moulding Technology on Microstructure, Tightness, and Mechanical Properties of CuSn10 Bronze. *Materials*. 2023. Vol. 16, № 24. P. 7593. URL: <https://doi.org/10.3390/ma16247593>
5. Nadolski M. The Evaluation of Mechanical Properties of High-tin Bronzes. *Archives of Foundry Engineering*. 2017. Vol. 17, № 1. Pp. 127–130. URL: <https://doi.org/10.1515/afe-2017-0023>
6. Bartocha D., Baron C., Suchoń J. The Influence of Solidification Rate on HightinBronze Microstructure. *Archives of Foundry Engineering*. 2023. URL: <https://doi.org/10.24425/afe.2018.125197>
7. Audy J. Effects of microstructure and chemical composition on strength and impact toughness of tin bronzes. *MM Science Journal*. 2009. Vol. 2009, № 02. Pp. 125–129. URL: https://doi.org/10.17973/mmsj.2009_06_20090303
8. Official Site of Copper Development Association, Inc. (USA). URL: <https://www.copper.org/applications/marine/cuni/alloys/pub-206-copper-alloys-for-marine-environments.pdf> (дата звернення : 04.05.2025).
9. Кімстач Т. В., Узлов К. І., Солоненко Л. І., Реп'ях С. І., Хричиков В. Є., Білий О. П., Білий А. П., Іванова Л. Х. Дослідження впливу домішок в бронзі БрО3А3 на її механічні властивості. *Теорія і практика металургії*. 2021. № 4 (129). С. 41–47. URL: <https://doi.org/10.34185/tpm.4.2021.05>
10. Воронко Ю. С., Якименко Д. Ю., Узлов К. І., Кімстач Т. В. Аналіз перспективності розробки та використання конструкційних бронз системи Cu–Sn–Si. *МОЛОДІ ВЧЕНІ 2025 – ВІД ТЕОРІЇ ДО ПРАКТИКИ : XV Всеукр. конф. мол. вч.* (20 березня 2025 р., м. Дніпро, Україна). 2025. С. 21–24.
11. Uzlov K. I., Mazorchuk V. F., Dziubina A. V. Structural formation regularity of Cu–Sn–Si system low-tin «singing» bronze. *Achievements of ukraine and eu countries in technological innovations and invention*. 2022. Pp. 466–487. URL: <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-254-8-16>
12. Nnakwo K. C., Nnuka E. E. Correlation of the Structure, Mechanical and Physical Properties of Cu–3wt%Si–xwt%Sn Silicon Bronze. *Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2018. №. 13. Pp. 83 – 91. URL: https://www.researchgate.net/publication/332858609_Correlation_of_the_Structure_Mechanical_and_Physical_Properties_of_Cu-3wtSi-xwtSn_Silicon_Bronze.
13. ASM Metals Handbook. Vol. 03 : Alloy Phase Diagrams (2016). ASM International. URL: http://www.asminternational.org/search/-/journal_content/56/10192/25871543/PUBLICATION
14. ASM Specialty Handbook : Copper and Copper Alloys. 2001. URL: https://books.google.com.ua/books?hl=uk&lr=&id=sxkPJzmkhnUC&oi=fnd&pg=PA3&dq=copper+alloys+properties&ots=ALru4fmwiT&sig=LpJwaHeZglwGgWtJ4m38xyCK45E&redir_esc=y#v=onepage&q=copper%20alloys%20properties&f=false

15. Kotadia H. R., Patel J. B., Fan Z. et al. Processing of Al–45Sn–10Cu Based Immiscible Alloy by a Rheomixing Process. *Solid State Phenomena*. 2008. Vol. 141–143. Pp. 529. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.141-143.529.
16. Mircovic D., Grober J., Schmid-Fetzer R.. Liquid Demixing and Microstructure Formation in Ternary Al–Sn–Cu Alloys. *Materials Science & Engineering*. 2008. A 487. Pp. 456. DOI: 10.1016/j.msea.2007.10.043.

REFERENCES

1. Liang Z., Jiang K. and Zhang T. Electrochemical and passive behaviour of Cu–Sn bronze in simulated archaeological soil media. *Materials and Corrosion*. 2020. URL: <https://doi.org/10.1002/maco.202011894>
2. Tin Bronze AMPCO METAL. AMPCO METAL. URL: <https://www.ampcometal.com/products/standard-alloys/tin-bronze/> (date of access : 04.05.2025).
3. Greshta V.L., Lysitsya O.V. and Stepanova L.P. *Kol'orovi metaly ta splavy na yikh osnovi : navchal'nyy posibnyk* [Non-ferrous metals and alloys based on them : a textbook]. Zaporizhzhia : ZNTU Publ., 2014, 286 p. (in Ukrainian).
4. Witasiaak D. et al. Effect of Alloying Additives and Moulding Technology on Microstructure, Tightness, and Mechanical Properties of CuSn10 Bronze. *Materials*. 2023, vol. 16, no. 24, p. 7593. URL: <https://doi.org/10.3390/ma16247593>
5. Nadolski M. The Evaluation of Mechanical Properties of High-tin Bronzes. *Archives of Foundry Engineering*. 2017, vol. 17, no. 1, pp. 127–130. URL: <https://doi.org/10.1515/afe-2017-0023>
6. Bartocha D., Baron C. and Suchoń J. The Influence of Solidification Rate on HightinBronze Microstructure. *Archives of Foundry Engineering*. 2023. URL: <https://doi.org/10.24425/afe.2018.125197>
7. Audy J. Effects of microstructure and chemical composition on strength and impact toughness of tin bronzes. *MM Science Journal*. 2009, vol. 2009, no. 02, pp. 125–129. URL: https://doi.org/10.17973/mmsj.2009_06_20090303
8. Official Site of Copper Development Association, Inc. (USA). URL: <https://www.copper.org/applications/marine/cuni/alloys/pub-206-copper-alloys-for-marine-environments.pdf>
9. Kimstach T.V., Uzlov K.I., Solonenko L.I., Repiakh S.I., Khrychikov V.Ye., Bilyi O.P., Bilyi A.P. and Ivanova L.Kh. *Doslidzhennia vplyvu domishok v bronzii BrO3A3 na yii mekhanichni vlastyvoli* [Investigation of impurities in bronze BrO3A3 influence on its mechanical properties]. *Teoriia i praktyka metalurhii* [Theory and Practice]. 2021, no. 4 (129), pp. 41–47. URL: <https://doi.org/10.34185/tpm.4.2021.05> (in Ukrainian).
10. Voronko Yu.S., Yakymenko D.Iu., Uzlov K.I. and Kimstach T.V. *Analiz perspektyvnosti rozrobky ta vykorystannia konstruktsiinykh bronz systemy Su–Sn–S* [Analysis of the prospects for the development and use of structural bronzes of the Cu–Sn–Si system]. *MOLODI VChENI 2025 – VID TEORII DO PRAKTYKY : XV Vseukrainska konferentsiia molodykh vchenykh* [YOUNG SCIENTISTS 2025 – FROM THEORY TO PRACTICE : XV All-Ukrainian Conference of Young Scientists]. March 20, 2025, Dnipro, Ukraine, pp. 21–24. (in Ukrainian).
11. Uzlov K.I., Mazorchuk V.F. and Dziubina A.V. Structural formation regularity of Cu–Sn–Si system low-tin “singing” bronze. *Achievements of Ukraine and EU Countries in Technological Innovations and Invention*. 2022, pp. 466–487. URL: <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-254-8-16>
12. Nnakwo K.C. and Nnuka E.E. Correlation of the Structure, Mechanical and Physical Properties of Cu–3wt%Si–xwt%Sn Silicon Bronze. *Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2018, no. 13, pp. 83–91. URL: https://www.researchgate.net/publication/332858609_Correlation_of_the_Structure_Mechanical_and_Physical_Properties_of_Cu-3wtSi-xwtSn_Silicon_Bronze.
13. ASM Metals Handbook. Vol. 03: Alloy Phase Diagrams. 2016. ASM International. URL: http://www.asminternational.org/search/-/journal_content/56/10192/25871543/PUBLICATION
14. ASM Specialty Handbook : Copper and Copper Alloys. 2001. URL: https://books.google.com.ua/books?hl=uk&lr=&id=sxkPJzmkhUC&oi=fnd&pg=PA3&dq=copper+alloys+properties&ots=ALru4fmwiT&sig=LpJwaHeZglwGgWtJ4m38xyCK45E&redir_esc=y#v=onepage&q=copper%20alloys%20properties&f=false
15. Kotadia H.R., Patel J.B., Fan Z. et al. Processing of Al–45Sn–10Cu Based Immiscible Alloy by a Rheomixing Process. *Solid State Phenomena*. 2008, vol. 141–143, pp. 529. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.141-143.529.
16. Mircovic D., Grober J. and Schmid-Fetzer R. Liquid Demixing and Microstructure Formation in Ternary Al–Sn–Cu Alloys. *Materials Science & Engineering*. 2008, A 487, pp. 456–467. DOI: 10.1016/j.msea.2007.10.043.

Надійшла до редакції 12.08.2025.