

УДК 621.74.04:669.34

Наумик В. В., Бялік Г. А., Адамчук С. І., Самойлов В. Є.

ОДЕРЖАННЯ ЗАГОТІВОК ДЛЯ ВКЛАДИШІВ ПІДШИПНИКІВ КОВЗАННЯ ІЗ ОЛОВ'ЯНИСТОЇ БРОНЗИ МЕТОДОМ БЕЗПЕРЕРВНОГО ЛИТТЯ

Підшипники ковзання широко застосовуються у сучасній техніці [1]. Один з найкращих матеріалів для їх виготовлення – це олов'яниста бронза [2]. Найпоширенішим методом виготовлення заготовок є двостадійний процес, що складається з одержання бронзових зливків та наступної обробки зливків тиском.

При цьому відбувається зміцнення одержаної стрічки за рахунок наклепу, що викликає необхідність у додатковій термічній обробці. Тому перспективними є одностадійні процеси, що дозволяють одержати кінцеву стрічкову заготовку методом безперервного лиття.

Метою роботи є одержання заготовок для вкладишів підшипників ковзання з олов'янистої бронзи методом безперервного лиття.

Принцип безперервного лиття полягає у послідовному твердінні рідкого металу в кристалізаторі з поступовим витягуванням із нього сформованої заготовки необхідного пересічення (рис. 1).

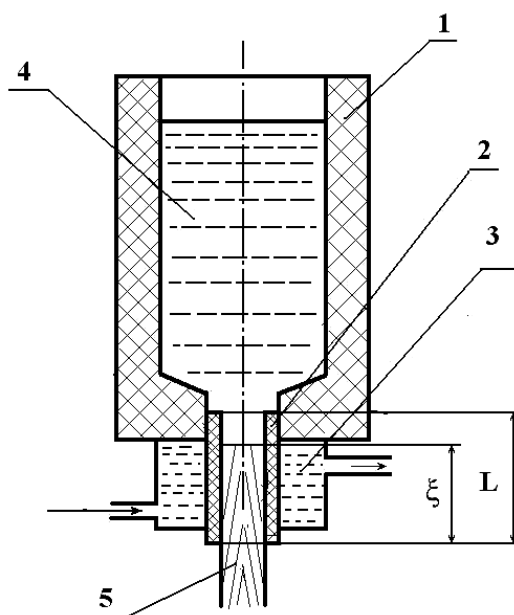


Рис. 1. Схема безперервного лиття заготовок:

1 – графітовий тигель; 2 – формуюча графітна вставка; 3 – мідний водоохолоджуваний кристалізатор; 4 – розплав бронзи; 5 – стрічкова заготовка

Відрізок заготовки, L , обмежений висотою формуючої графітової вставки, можна розглядати, як вилівок в процесі кристалізації. Тоді долю твердої фази, ξ , можна визначити за правилом неврівноваженого важеля [3]:

$$\xi = 1 - \left(\frac{T_0 - T}{T_0 - T_L} \right)^{-1 - K_0}, \quad (1)$$

де T_0 – температура розплаву;

T_L – температура ліквідусу;

T – температура вилівка на виході із кристалізатора;

K_0 – рівноважний коефіцієнт розподілу легуючого додатку.

В бронзі ОЦС 5-5-5 є три легуючі добавки: олово, цинк і свинець. Згідно діаграмам стану цинк при вмісту 5 % не утворює крихких інтерметалідних фаз. Свинець взагалі практично не розчинюється у твердій міді і утворює глобулярні частинки. Олово утворює з міддю декілька інтерметалідних поєднань, серед яких є досить крихкі [3].

В даній роботі, в першу чергу, розглядали вплив олова на особливості безперервного лиття стрічкових заготовок із бронзи.

Раніше проведеними дослідженнями було доведено, що температура розплаву для малорозмірних заготовок з міді повинна бути на рівні 1200–1250 °С [4].

При середньому вмісті олова 5 % температура $T_L = 1050$ °С [5].

Температура вилівка на виході з кристалізатора, T , може змінюватись у дуже широких межах: від температури оточуючого середовища до температури ліквідусу.

Згідно розрахункам, виконаним за формулою (1), доля твердої фази залежить від температури розплаву, T_0 , і температури вилівку на виході з кристалізатора, T . У випадку коли $T = T_L$, $\xi = 0$ і розплав вільно витікає з кристалізатора.

Процес безперервного лиття починається з розплавлення частини затравки, яка вводиться у формоутворюючий канал. Верхній край затравки знаходиться у тиглі, де утворюється розплавлений метал. Під дією розплавленого металу у формоутворюючій вставці розплавляється частина затравки, яка дорівнює $l - \xi$. Після досягнення рівноваги між долями твердої і рідкої фази починається процес витягування стрічкової заготовки.

У випадку малорозмірних заготовок у вигляді стрічок інтегральний фронт кристалізації наближається до плаского. При цьому поблизу твердої фази розплав збагачується легуючими елементами – оловом, цинком і свинцем, що входять до складу бронзи.

При безперервному литті довжина розплаву набагато перевищує поперечне пересічення заготовки. Тому для визначення концентрації легуючого елемента поблизу фронту кристалізації можна застосувати рівняння [6]:

$$C_P = C_0 + C_0 \cdot \left(\frac{1 - K_0}{K_0} \right) \cdot e^{-\left(\frac{R \cdot X}{D_P} \right)}, \quad (2)$$

де C_P – концентрація легуючого елемента поблизу фронту кристалізації;

C_0 – середня концентрація легуючого елемента у розплаві;

K_0 – рівноважний коефіцієнт розподілу;

R – швидкість кристалізації;

X – відстань від фронту кристалізації;

D_P – коефіцієнт дифузії легуючого елемента у розплаві.

Рівноважний коефіцієнт розподілу легуючого елемента, K_0 , дорівнює відношенню граничної розчинності легуючого елемента у твердій та рідкій фазі.

Згідно до діаграми стану Cu–Sn максимальна розчинність олова при температурі 800 °С дорівнює 13,57 %. Відповідно, K_0 при цій концентрації складає 0,271.

На рис. 2. наведено розподіл концентрації олова поблизу фронту кристалізації для різних швидкостей кристалізації, R .

На відстані X переважає дифузійний масообмін. Максимальна концентрація олова на фронті кристалізації досягає 18,44 %.

Згідно діаграмі стану Cu–Sn, за умов вмісту олова більше 6 %, поряд з α -розчином утворюється крихка β -фаза [7].

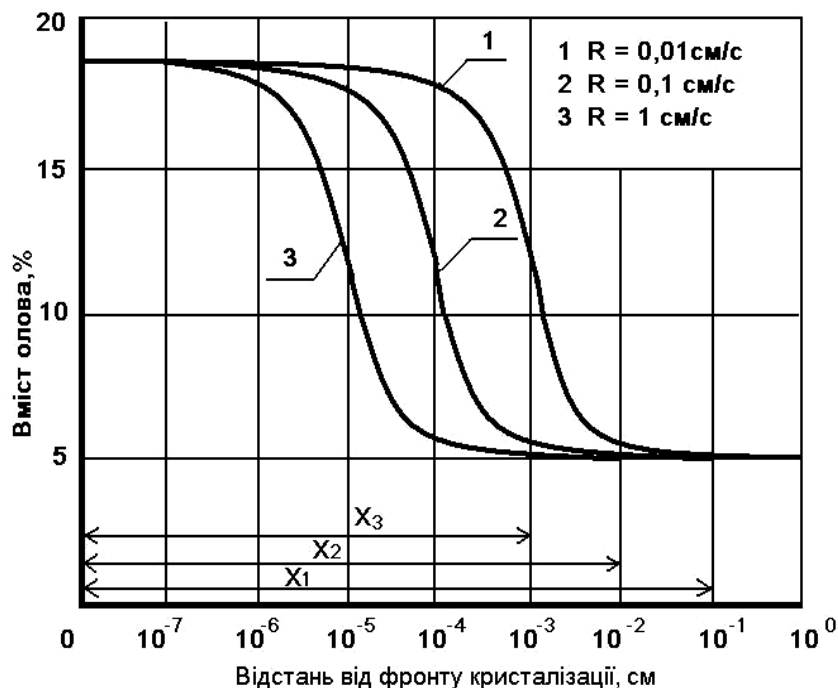


Рис. 2. Розподіл концентрації олова поблизу фронту кристалізації

Зростання концентрації олова на фронті кристалізації відбувається не миттєво, для цього потрібен деякий час. У формуючій графітовій вставці масоперенос здійснюється, переважно, за рахунок дифузії. Час, за який атоми легуючого елемента пересуваються на відстань, X , можна визначити за формулою:

$$\tau = \frac{X^2}{2 \cdot D_P} \quad (6)$$

де X – відстань від фронту кристалізації;

D_P – коефіцієнт дифузії легуючого додатку в рідкій основі.

Коефіцієнт дифузії металевих легуючих додатків у рідкій основі залежить від граничної розчинності цього додатку у основі [8]. Якщо використати дані, що наведено у цій роботі, можна визначити таку залежність коефіцієнту дифузії певного елемента від межі розчинності у твердій основі:

$$D_P = 6,457 \cdot C_M^{-0,707} \cdot 10^{-5}; \quad r = -0,955, \quad (7)$$

де C_M – межа розчинності елемента в твердій основі (ат. %).

Виходячи з наведеного рівняння, для олова $D_P = 1,615 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2/\text{с}$.

Довжина зони дифузійного масообміну, X , залежить від швидкості кристалізації, R . В табл. 1 наведено час формування підвищеної концентрації олова на фронті кристалізації при швидкості кристалізації 0,1 см/с.

Час формування підвищеної концентрації олова на фронті кристалізації дорівнює максимальному часу безперервного витягування заготовки, після чого треба зупинити витягування на деякий час для зниження концентрації олова до середньої у бронзі (5%), щоб запобігти утворенню на фронті кристалізації значної кількості крихкої фази і руйнації литої заготовки.

Таблиця 1

Час формування підвищеної концентрації олова на фронті кристалізації

Довжина зони дифузійного масообміну, X , см	Час формування підвищеної концентрації олова, с.	Час гомогенізації концентрації олова в зоні дифузійного масообміну
1·10 ⁻³	0,031	0,02
2·10 ⁻³	0,124	0,06
3·10 ⁻³	0,279	0,19
4·10 ⁻³	0,496	0,26
5·10 ⁻³	0,773	0,40
6·10 ⁻³	1,114	0,57
7·10 ⁻³	1,517	0,78
8·10 ⁻³	1,981	1,02
9·10 ⁻³	2,507	1,29
1·10 ⁻²	3,096	1,59
2·10 ⁻²	12,383	6,38
3·10 ⁻²	27,864	14,36
4·10 ⁻²	49,535	25,53
5·10 ⁻²	77,399	39,90
6·10 ⁻²	111,455	57,45
7·10 ⁻²	151,702	78,20
8·10 ⁻²	198,142	102,14
9·10 ⁻²	250,773	129,27
1·10 ⁻¹	309,597	159,59

Після зупинки витягування починається процес гомогенізації, коли концентрація олова в кожній точці рідкої фази прямує до постійного значення (5 %), за якого розплав стає гомогенним. У будь-якому неоднорідному матеріалі концентрація змінюється на відстані l від максимального значення на фронті кристалізації C_P до C_0 . Перехід від концентрації C_P до концентрації C_0 можна визначити за формулою [9]:

$$C_P - C_0 = e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (8)$$

де τ – константа, яку називають часом релаксації:

$$\tau = \frac{l^2}{\pi^2 \cdot D_P}. \quad (9)$$

Якщо $C_P - C_0$ позначити, як ΔC , то час гомогенізації розплаву можна визначити за наступною формулою:

$$t = \left| \frac{\ln \Delta C \cdot l^2}{\pi^2 \cdot D_P} \right|. \quad (10)$$

Розрахований за формулою (10) час гомогенізації в зоні дифузійного масообміну наведено в табл. 1.

З табл. 1 можна вибрати оптимальний діапазон часу витягування і зупинки литої заготовки в процесі безперервного лиття.

Виконані теоретичні дослідження були використані при відпрацюванні технологічного процесу одержання безперервнолитої бронзової заготовки на розробленій для цього установці, схема якої наведена на рис. 3.

Установка складається з графітового тигля, 1, розташованого всередині індуктора індукційної печі, 6, за допомогою якого відбувається розплавлення металу, 4. У графітовій формоутворюючій вставці, 2, за допомогою водоохолоджуваного кристалізатора, 3, формується безперервнолита заготовка, 5, яка витягується пристроєм, 7, і намотується на барабан, 8. Пристрій для витягування має привід з двигуном постійного струму, що дозволяє в широких межах змінювати швидкість витягування. До складу установки входить електромеханічний комутатор, що дозволяє здійснювати витягування заготовки як безперервно, так і з періодичними зупинками. Температуру рідкої бронзи у тиглі вимірювали за допомогою радіаційного пірометра ТЕРА-50, в якості вторинного приладу використовували цифровий мілівольтметр. На виході з кристалізатора температуру заготовки вимірювали за допомогою хромель-алюмелевої контактної термомпари.

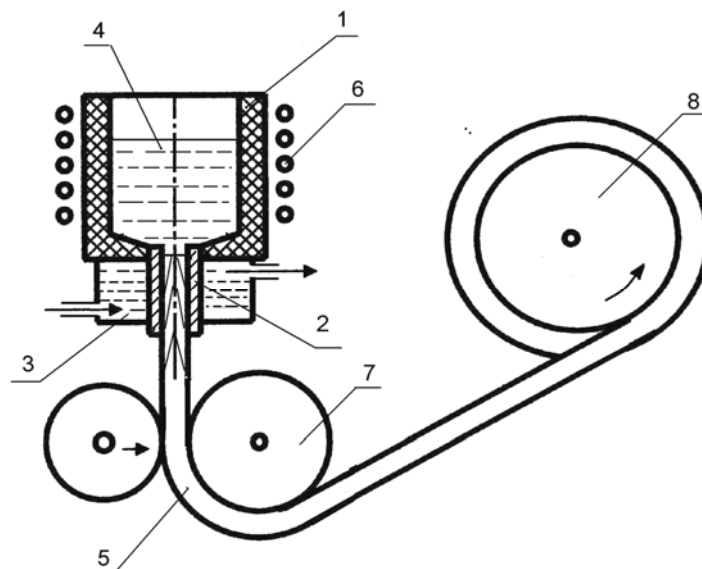


Рис. 3. Схема установки для одержання безперервнолитої бронзової заготовки для підшипників ковзання

Були виконані дослідні плавки бронзи ОЦС 5-5-5 по двом варіантам: безперервно та з періодичними зупинками.

При безперервному режимі витягування спочатку заготовка була якісною. Але через 20 секунд на одній із сторін стрічки почали утворюватись дефекти у вигляді рванин, які швидко поширювались. Ще через 30 секунд стрічка обірвалася. Таким чином, виходячи з даних, наведених в таблиці 1, для отримання якісної заготовки для підшипників ковзання, що не буде вимагати подальшої механічної обробки, необхідно забезпечити довжину зони дифузійного масообміну не більшою за $2 \cdot 10^{-2}$ см, тобто тривалість безперервного витягування має бути не більшою 2–3 секунд.

Дефектні зони заготовки було досліджено за допомогою растрового електронного мікроскопа РЕМ-106І.

При дослідженні було виявлено малорельєфні темні зони, що можна розглядати, як центри крихкої руйнації (рис. 4). Згідно результатам рентгеноспектрального мікроаналізу, в цій зоні вміст свинцю та цинку знаходився в межах марочного складу, вміст олова перебільшував марочний майже вдвічі. Це підтверджує наявність на поверхні руйнації крихкої β -фази.

За другим варіантом заготівка витягувалася протягом двох секунд з наступною зупинкою протягом однієї секунди. Була отримана якісна заготівка.

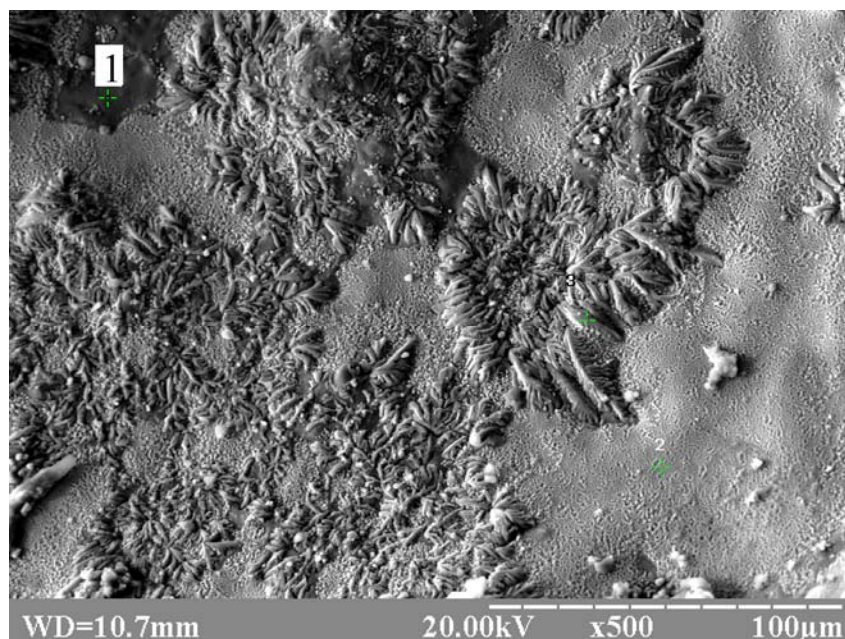


Рис. 4. Мікроструктура поверхні руйнації бронзової заготівки

ВИСНОВКИ

Таким чином, встановлено причини виникнення дефектів при безперервному литті заготовок з бронзи.

Встановлено, що необхідною умовою отримання якісної бронзової заготівки для підшипників ковзання є витягування за режимом, яким передбачено, періодичні зупинки для гомогенізації рідкої фази поблизу фронту кристалізації.

За результатами комплексу проведених досліджень визначено оптимальну тривалість періодів витягування та необхідної зупинки при безперервному литті заготовок з бронзи ОЦС 5-5-5.

ЛІТЕРАТУРА

1. Производство отливок из сплавов цветных металлов : учебник для вузов / А. В. Курдюмов, М. В. Пикунов, В. М. Чурсин, Е. Л. Бибииков. – М. : Металлургия. – 1986. – 416 с.
2. Лебедев К. П. Литейные бронзы / К. П. Лебедев. – Л. : Машиностроение. – 1973. – 312 с.
3. Разработка параметров затвердевания и конструкции кристаллизаторов для круглых непрерывнолитых слитков из меди / А. Н. Смирнов, С. В. Гридин, Ю. Д. Савенков, Д. В. Спиридонов // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2008. – № 6. – С. 72–75.
4. Разработка рациональной экологически безопасной технологии переработки отходов меди и сплавов на её основе / В. В. Наумик, Г. А. Бялик, С. И. Адамчук, В. В. Лунёв // *Теория и практика металлургии*. – 2007. – № 6. – С. 13–20.
5. Лившиц В. Г. Металлография / В. Г. Лившиц. – М. : Металлургиздат, 1963. – 422 с.
6. Романов А. А. Некоторые вопросы зарождения неметаллических включений / А. А. Романов // *Проблемы сталеного слитка*. – М. : Металлургия, 1969. – С. 146–150.
7. Лахтин Ю. М. Металловедение / Ю. М. Лахтин. – М. : Металлургия, 1979. – 320 с.
8. Еришов Г. С. Строение и свойства жидких и твердых металлов / Г. С. Еришов, В. А. Черняков. – М. : Металлургия., 1973. – 248 с.
9. Кана Р. Физическое металловедение / под ред. Р. Кана // *Фазовые превращения, металлография*. – М. : Мир, 1968. – Вып. II. – 490 с.