

**Скачков Віктор Олексійович**, професор, доктор технічних наук, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0002-4447-4641

**Карпенко Ганна Володимирівна**, кандидат технічних наук, доцент кафедри, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0003-3504-0283

**Курінний Максим Сергійович**, аспірант, Запорізький національний університет, ORCID: 0009-0004-5752-8954

**Гнатишак Андрій Русланович**, аспірант, Запорізький національний університет, ORCID: 0009-0007-3248-1733

## ВПЛИВ КОМПОНЕНТІВ ЛІГАТУР НА ФУНКЦІОНАЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ КАЛЬЦІЄВИХ БАБІТІВ

Робота присвячена процесам створення високоякісного бабітового шару підшипників за рахунок використання в шихті великої кількості первинного бабіту. Утворення великої кількості відходів у виробництві бронзо-бабітових вкладишів знижує техніко-економічні показники, погіршує екологічну ситуацію на підприємстві та в регіоні. У зв'язку з цим потрібно створення технології, в якій використовується більша кількість відходів кальцієвого бабіту.

Бронзо-бабітові вкладиші є найпоширенішою конструкцією підшипників колінчастих валів дизелів тепловозів. Традиційна технологія виробництва бронзо-бабітових вкладишів підшипників ковзання передбачає заливку в бронзовий каркас сплаву на основі кальцієвого бабіту. Зазвичай заливка здійснюється відцентровим способом, а шихта розплавляється в тиглі електричної печі.

Основне завдання дослідження спрямоване на комплексне дослідження функціональних властивостей кальцієвих бабітів та оцінки впливу кожного компонента бабітів на кількісні характеристики якісних показників, включно з процесами старіння, зносу, формування твердості, механічної міцності та дефектів структури.

Основні експлуатаційні характеристики бронзо-бабітових вкладишів підшипників ковзання (твердість, ударна в'язкість, межа міцності на розтягнення, інтенсивність зносу) залежать від цілого набору структурних параметрів, технологічних особливостей отримання та хімічного складу. При цьому вплив кожного окремого фактора має суттєво нелінійний характер.

Вивчення твердості зразків бабіту при старінні до одного року дало змогу встановити, що добавка магнію сприяє підвищенню цієї характеристики. Так, за рахунок добавки магнію через 80 діб витримки твердість зразків зростає в 1,5 рази, досягаючи HB=25.

Математичним опрацюванням отриманих даних встановлено, що вплив легуючих елементів і тривалості витримки на твердість бабіту оцінюється регресійним рівнянням у вигляді кубічних сплайнів. За результатами комплексного дослідження впливу хімічних елементів на механічні характеристики бабіту БК2 методом регресійного аналізу побудовано апроксимацію квадратичними сплайнами за кожним легувальним елементом.

Ключові слова: кальцієвий бабіт, підшипник ковзання, твердість, межа міцності, в'язкість, механічна міцність.

*Вступ.* Виробництво бронзо-бабітових вкладишів підшипників ковзання колінчастих валів дизельних двигунів (багатотоннажних автомобілів, тепловозів) є високозатратним. Це зумовлено необхідністю створення високоякісного бабітового шару підшипників за рахунок використання в шихті великої кількості первинного бабіту.

Утворення великої кількості відходів у виробництві бронзо-бабітових вкладишів знижує техніко-економічні показники, погіршує екологічну ситуацію на підприємстві та в регіоні. У зв'язку з цим потрібне створення такої технології, в якій використовується більша кількість відходів кальцієвого бабіту.

Можливість підвищення частки повернення кальцієвого бабіту в шихті для виплавки вкладок обмежується зміною хімічного складу розплаву внаслідок чаду кальцію і натрію. Зі зменшенням вмісту цих компонентів знижується твердість бабіту, яка є однією з основних характеристик його якості.

Бронзо-бабітові вкладиші виготовляють методом відцентрової заливки бабіту в бронзовий корпус із подальшою механічною обробкою [1].

Якість бабіту, що визначається хімічним складом, є основним чинником, що підвищує працездатність вкладиша. До антифрикційних сплавів для тонкошарових підшипників висувають такі вимоги [2]:

- бабіт не повинен мати різко вираженої неоднорідної структури, а тим більше великих, нерівномірно розподілених кристалів твердої складової;

- робота підшипників здебільшого протікає в умовах рідинного тертя, тому підвищені антифрикційні властивості бабіту не мають вирішального значення, а більш важливим для збільшення працездатності фрикційного шару є здатність сплаву чинити опір втомному руйнуванню;

- антифрикційний сплав застосовується з твердістю 17...23 НВ, що є оптимальним з погляду забезпечення гарного припрацьовування сплаву і досягнення необхідного опору зминання в тонкому шарі вкладиша;

- для забезпечення кращої працездатності істотне значення має міцність з'єднання бабіту з корпусом і, зокрема, здатність шару полуди чинити опір втомному руйнуванню циклічних навантажень.

Застосовуваний нині кальцієвий бабіт марки БК2 (ГОСТ ДСТУ 1209-90) відповідає наведеним вимогам тільки за умови ретельного дотримання технології заливки у зв'язку зі схильністю в процесі плавки до вибіркового окислення [3]. Передусім окислюються натрій і кальцій, а це призводить до зниження твердості залитого шару. Для захисту від чаду застосовується комплекс заходів – введення магнію в розплав, використання деревного вугілля, обмеження часу заливки.

Відомо, що сплави свинцю, які містять кальцій, натрій і магній, здатні до природного старіння, що зовні виражається в підвищенні твердості з плином часу [4]. Для кальцієвого бабіту цей процес проходить фактично протягом перших трьох днів після заливки. Металографічні дослідження показують, що одразу ж після заливки сплав складається з легованої матриці та первинних кристалів  $\text{CaPb}_3$  [4]. Матричний склад нестійкий та розпадається за спіноїдальним механізмом старіння, утворюючи зміцнювальну структуру неоднорідного твердого розчину [5].

Для дотримання всіх вимог щодо якості литого антифрикційного бабітового шару в удосконаленій технології досліджували вплив легувальних і домішкових елементів на структуру і властивості сплаву, а також дефектоутворення в бабітах.

*Аналіз досліджень і публікацій.* Нині бронзо-бабітові вкладиші є найпоширенішою конструкцією підшипників колінчастих валів дизелів тепловозів. Традиційна технологія виробництва бронзо-бабітових вкладишів підшипників ковзання передбачає заливку в бронзовий каркас сплаву на основі кальцієвого бабіту [6]. Зазвичай заливка здійснюється відцентровим способом, а шихта розплавляється в тиглі електричної печі.

Першими бабітами, що набули широкого поширення в практиці поряд з високооолов'янистими сплавами, стали сплави на свинцевистій основі [7]. Склади цих бабітів були такими, (%): олова до 16, сурми 16, свинцю 65-84, міді – до 3.

Для залізничної техніки було запропоновано марки бабітів із таким хімічним складом (%): марка 1К – 16 Sn, 16 Sb, 3 Cu, 65 Pb; марка 2К – 12 Sn, 15 Sb, 3 Cu, 70 Pb; марка 3К – 17 Sb, 83 Pb.

До складу шихти входять чушковий бабіт БК2 або БК2Ш і переплав бабітової стружки. На готовому вкладиші після механічного оброблення залишається не більше 10% залитого сплаву, решта переходить у стружку, яку надалі окремо переплавляють, розплав відливають у чушки, і використовують як вторинний матеріал.

Відомо [2], що під час розплавлення кальцієвого бабіту відбувається інтенсивне окислення легувальних елементів – кальцію, натрію, магнію, внаслідок чого знижується твердість залитого антифрикційного шару. Це знижує експлуатаційні характери-

стики вкладишів, а також є основним обмежувальним фактором під час використання переплаву стружки, в якому легувальні елементи вже вигоріли під час попереднього дворазового розплавлення. Якість бабіту, що визначається його хімічним складом, є основним фактором, що впливає на працездатність вкладиша. У зв'язку з цим, частка переплаву в складі шихти при заливці вкладишів не перевищує 50%. При серійному виробництві вкладишів постійне накопичення переплаву досягає багатьох тонн щомісяця, а ціни, за якими металургійні заводи закуповують його як відходи виробництва, на порядок нижчі за ціну на бабіт БК2. Утворення відходів виробництва у великих кількостях знижує техніко-економічні показники процесу виробництва вкладишів.

Більшість подальших робіт з дослідження і розроблення нових марок бабітів проводили в напрямку зниження використання дорогого олова. З малоолов'янистих бабітів для подальшої модифікації обрано бабіт марки Б10. Однак цей бабіт не був рівноцінним заміником високоолов'янистих бабітів. Бабіт Б10 мав невисокі антифрикційні властивості, знижені ливарні якості і порівняно погано працював у підшипниках, що сприймають ударні навантаження [8].

У роботах [9,10] встановлено, що невеликі добавки миш'яку (As) і кадмію (Cd) підвищують твердість малоолов'янистих бабітів типу Б10 як при підвищеній, так і при нормальній температурі, подрібнюють структуру та збільшують рідинну текучість сплавів. На підставі проведених досліджень було запропоновано три миш'яково-кадмієві бабіти. Це бабіти такого хімічного складу (%): 11 – 12 Sn, 11 – 11,5 Sb, 1,2 – 1,7 As, 1,5 – 2,0 Cu, 1,3 – 1,8 Cd, решта – Pb. Подальші роботи були спрямовані шляхом використання інших облагороджувальних присадок до бабіту Б10. Зокрема, були проведені дослідження зі встановлення впливу телуру та нікелю [5]. Невеликі добавки телуру (від 0,05 до 0,15 %) показали, що цей елемент діє як модифікатор, подрібнюючи структуру сплавів. Механічні властивості литих сплавів від введення телуру змінюються в бік збільшення пластичності. Значне збільшення пластичності з введенням телуру спостерігається після відпалу цих бабітів за температури 220-230<sup>0</sup> С. Після відпалу подовження збільшується від 3 до 12 %, а також майже в 2 рази збільшується ударна в'язкість.

На залізничному транспорті олов'яні та свинцево-олов'яні бабіти застосовуються в порівняно невеликій кількості. Найпоширеніший на залізничному транспорті бабіт кальцієвий, до складу якого входять лужні та лужноземельні метали [11]. Нині цим бабітом заливають усі вагонні та більшість паровозних підшипників. Кальцієвий бабіт замінив у 1931р. свинцево-сурм'янистий бабіт марки БС.

Уперше науковий виклад питання про кальцієві бабіти та їх дослідження опубліковано в роботах [6,12]. За результатами розроблення бабіту БК2 легувальні елементи забезпечували досягнення наступних цілей: кальцій – створення дрібнодисперсної твердої фази; натрій – зміцнення матриці; магній – зміцнення матриці та подрібнення мікроструктури; олово – поліпшення розкислення [6, 7, 13].

У роботах [9,14] встановлено, що невеликі добавки лужних і лужноземельних металів істотно підвищують твердість свинцю. При цьому подрібнюється зерно сплаву й істотно поліпшуються інші механічні характеристики. Твердість свинцевого сплаву, що містить 0,73% Ca, 0,58% Na, 0,04% Li, становить 340 МПа.

Антифрикційні сплави, що застосовуються в підшипниках ковзання, працюють у різних умовах: у закритих об'єктах із примусовою циркуляцією змащення, у нещільно закритих об'єктах із самопливною подачею змащення [15,16]. Однак, незважаючи на ці відмінності, вимоги, що висуваються до антифрикційних бабітів, мають загальний характер [10, 11, 24]. Найповніше відповідають цим загальним вимогам бабіти марок БКА, БК2 і БК2Ш [17, 18,19].

*Постановка завдання дослідження.* Основне завдання дослідження спрямоване на комплексне дослідження функціональних властивостей кальцієвих бабітів та оцінки впливу кожного компонента бабітів на кількісні характеристики якісних показників, включно з процесами старіння, зносу, формування твердості, механічної міцності та дефектів структури.

*Методи та засоби дослідження.*

*Визначення твердості бабіту.* Для оцінки властивостей матриці та ідентифікації продуктів, одержуваних під час спиноїдального розпаду бабітів, твердість досліджу-

вали із застосуванням мікротвердоміра ПМТ-3.

Твердість бабіту визначали на пробах, форма і габарити яких відповідали розмірам 10x50x15 мм. Твердість перевіряли за ДСТУ ISO 6506-1:2007, ДСТУ ISO 6506-4:2008 при навантаженні  $P=2,5$  кН з використанням кульки діаметром 10 мм. Необхідному інтервалу твердості НВ 12-23 відповідають діаметри відбитків 4,2-3,7 мм, контроль твердості проводять не раніше, ніж через 3 години після виливки зразків. Подібні зразки використовувалися для визначення вмісту в бабіті хімічних елементів методом спектрального і рентген флуоресцентного аналізу.

Для деяких плавок бабіту твердість вимірювали на приладі ХП0250 (фірма «Карл Цейс», НДР) кулькою діаметром 2,5 мм за навантаження 153 Н.

*Визначення ударної в'язкості.* Ударну в'язкість визначали відповідно до ГОСТ 9012-59 (ISO 410-82, ISO 6506-81) на зразках без надрізу на маятниковому копрі (0,3 кН). Ця характеристика є структурно чутливою для бабітів і багато в чому залежить від хімічного складу. Випробування на розтягнення проводили на циліндричних зразках за ГОСТ 1497-84 (ISO 6892-84) на машині типу «Амслер».

*Випробування на зношування.* Найважливішим параметром, що оцінює експлуатаційні характеристики бронзо-бабітових вкладишів, є інтенсивність зношування. Випробування на зношування здійснювали на машині тертя 2070 СМТ-1.

З кожної партії бабітів, що відрізняються хімічним складом, виготовляли зразки з розмірами 10×11×16 (мм×мм×мм).

Випробування на знос проводилися за схемою колодка-диск. Перед випробуваннями зразки піддавалися попередньому припрацюванню по контртілу, виконаному у вигляді диска діаметром 50 мм із сірого чавуну.

Випробування проводилися за питомого тиску 1,0 і 1,5 МПа в умовах сухого тертя. Швидкість відносного ковзання становила 4-5 м/хв.

Масовий знос визначали за формулою:

$$I_m = \frac{m_0 - m}{V \cdot \tau \cdot S} \quad (1)$$

де  $m_0, m$  – початкова та кінцева маса зразка, г;  $V$  – швидкість відносного ковзання, м/хв;  $\tau$  – час випробувань, хв;  $S$  – площа зносу, м<sup>2</sup>.

Визначення маси зразків проводили на аналітичних вагах WA-51 з точністю  $\pm 1 \cdot 10^{-4}$  г.

Лінійний знос розраховували:

$$I_L = \frac{h_0 - h}{V \cdot \tau} \quad (2)$$

де  $h_0, h$  – висота зразка до і після випробувань, яку визначали прямим вимірюванням з точністю  $\pm 1 \cdot 10^{-3}$  мм.

Інтенсивність зносу визначали середнім значенням за 3...5 паралельними випробуваннями в межах кожної відібраної проби.

*Метод регресійного аналізу.* Основні експлуатаційні характеристики бронзо-бабітових вкладишів підшипників ковзання (твердість, ударна в'язкість, межа міцності на розтягнення, інтенсивність зносу) залежать від цілого набору структурних параметрів, технологічних особливостей отримання та хімічного складу. При цьому вплив кожного окремого фактора має суттєво нелінійний характер.

З огляду на те, що кількісні значення чинників, які враховуються, мають детермінований вигляд, а оцінювані характеристики вкладок набувають випадкових значень, лінію регресії можна представити у вигляді квадратичних сплайнів за кожним фактором

$$\theta = \sum_{i=1}^N (\alpha_i + \beta_i \chi_i + \delta_i \chi_i^2) \quad (3)$$

де  $\theta$  – характеристика вкладиша (твердість, ударна в'язкість тощо);  $\chi_i$  –  $i$ -й враховуваний фактор;  $\alpha_i, \beta_i, \delta_i$  – визначувані випадкові параметри;  $N$  – кількість факторів, що враховуються.

У рівнянні (3)  $\theta$  і параметри  $\alpha_i, \beta_i, \delta_i$  мають випадковий характер. Їхня ідентифікація передбачає завдання оцінки математичного очікування і другого центрального моменту



розподілу – дисперсії.

Усереднюючи співвідношення (3) отримаємо:

$$\bar{\theta} = \sum_{i=1}^N (a_i + b_i \cdot \chi_i + d_i \cdot \chi_i^2), \quad (4)$$

де  $\bar{\theta}$ ,  $a_i$ ,  $b_i$ ,  $d_i$  – оцінки математичних очікувань  $\bar{\theta}$ ,  $a_i$ ,  $b_i$ ,  $d_i$  відповідно.

Для обчислення оцінок математичних очікувань параметрів  $a_i$ ,  $b_i$ ,  $d_i$  потрібне виконання мінімізації функціонала суми квадратів відхилень обчислених значень характеристик за формулою (4) від їхніх експериментальних значень:

$$\Phi = \sum_{k=1}^m \left( F_k - \sum_{i=1}^N (a_i + b_i \chi_{ki} + d_i \chi_{ki}^2) \right)^2 \rightarrow \min \quad (5)$$

де  $F_k$  – дослідне середнє значення характеристики  $\theta^0$  у  $k$ -тому досліді;  $\chi_{ki}$  – значення фактора з номером  $i$ , у  $k$ -тому досліді;  $m$  – загальна кількість проведених експериментів.

Виконання вимоги умови (5) призводить до системи

$$\frac{\partial \Phi}{\partial a_p} = 0; \quad \frac{\partial \Phi}{\partial b_p} = 0; \quad \frac{\partial \Phi}{\partial d_p} = 0. \quad (6)$$

Обчислюючи похідні (6) і здійснивши перетворення, отримаємо систему рівнянь:

де:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^N A_{api} a_i - B_{api} b_i + D_{api} d_i &= C_{ap} \\ \sum_{i=1}^N (A_{bpi} a_i + B_{bpi} b_i + D_{bpi} d_i) &= C_{bp} \\ \sum_{i=1}^N (A_{dpi} a_i + B_{dpi} b_i + D_{dpi} d_i) &= C_{dp} \end{aligned} \quad (7)$$

де:

$$\begin{aligned} A_{api} &= \sum_{k=1}^m 1_k; \quad B_{api} = \sum_{k=1}^m 1_{ki} i; \quad D_{api} = \sum_{k=1}^m \chi_{ki}^2 i; \\ A_{bpi} &= \sum_{k=1}^m \chi_{pk}; \quad B_{bpi} = \sum_{k=1}^m \chi_{ki} \chi_{kp}; \quad D_{bpi} = \sum_{k=1}^m \chi_{ki}^2 \chi_{pk}; \\ A_{dpi} &= \sum_{k=1}^m \chi_{pk}^2; \quad B_{dpi} = \sum_{k=1}^m \chi_{ki} \chi_{kp}^2; \quad D_{dpi} = \sum_{k=1}^m \chi_{ki}^2 \chi_{pk}^2; \\ C_{ap} &= \sum_{k=1}^m F_k; \quad C_{bp} = \sum_{k=1}^m F_k \chi_{pk}; \quad C_{dp} = \sum_{k=1}^m F_k \chi_{kp}^2; \end{aligned}$$

У системі (7) параметр  $p$  набуває значень від 1 до  $N$ . Система (7) містить  $3 \times N$  рівнянь для  $3 \times N$  невідомих, лінійно залежить від невідомих  $a_i, b_i, d_i$  і може бути розв'язана будь-яким відомим способом. Найкращим є метод Гауса з вибором головного елемента.

Адекватність моделі (4) оцінюється за виконанням умови

$$F_p < F_T \quad (8)$$

де  $F_p$  і  $F_T$  – розрахункове і табличне значення критерію Фішера.

Розрахункове значення критерію Фішера визначається за формулою:

$$F_p = S_{aq}^2 / S^2 \quad (9)$$

Дисперсії коефіцієнтів рівняння регресії (3) визначаються співвідношенням:

$$S_{(\alpha, \beta, \delta)}^2 = \frac{S^2}{m} \quad (10)$$

Межі довірчого інтервалу для лінії регресії (4) задаються співвідношеннями:

$$G_H = \bar{\theta} - t_{\frac{\alpha}{2}} \cdot \sigma_{\theta}$$

$$G_B = \bar{\theta} + t_{\frac{\alpha}{2}} \cdot \sigma_{\theta} \quad (11)$$

де  $G_H$  і  $G_B$  – нижня і верхня оцінки довірчого інтервалу;  $t_{\frac{\alpha}{2}}$  – критерій Стюдента, для довірчої ймовірності  $\alpha$  і ступеня свободи  $f=N-1$ ;  $\sigma_{\theta}$  – середнє квадратичне відхилення  $\theta$ .

Основна розрахунково-експериментальна частина.

*Старіння кальцієвих бабітів.* Під старінням розуміють зміну механічних властивостей сплаву з часом. Вона відбувається за рахунок виділення в матричному розчині частинок другої фази [20].

Сплави, що старіють, є пересиченими твердими розчинами, які є нестійкими при даній температурі і мають максимальну вільну енергію. Відповідно до термодинаміки, у будь-якій стійкій системі, що перебуває за постійної температури і тиску, вільна енергія прагне до мінімуму. За цих умов сплав прагне до зменшення вільної енергії шляхом виділення з пересиченого розчину атомів у самостійну фазу, яка є стабільною за цієї температури і має меншу енергію. Розпад пересиченого твердого розчину може протікати трьома способами [5, 20, 21]:

Перший спосіб – пряме перетворення менш стабільних фаз на більш стабільні зі зміною типу решітки в межах об'єму виділення без участі матриці. Цей шлях може реалізуватися тільки за невеликої різниці в структурі нових утворень і тому зустрічається рідко.

Другий спосіб полягає в зародженні  $\beta^1$ -фази на зонах Гінґе-Престона та зростанні виділень  $\beta^1$ -фази в матриці із зародженням  $\beta$ -фази на виділеннях  $\beta^1$ -фази та зростанні частинок  $\beta$ -фази в матриці.

Третій спосіб базується на незалежному зародженні більш стабільної фази в матриці подалі від виділень менш стабільної фази, не зачіпаючи зони Гінґе-Престона.

Кальцієві бабіти є сплавами, що структурно старіють. Однак вимоги до корінних і шатунних вкладишів дизельних двигунів внутрішнього згоряння передбачають умову збереження – забезпечення вимог працездатності протягом терміну зберігання.

У таблиці 1 наведено результати вимірювання твердості зразків сплаву БК2 при старінні протягом 1 року. Ці зразки були виплавлені без застосування магнію.

Таблиця 1 – Твердість зразків дослідних плавок залежно від часу старіння

Номер плавки	Час взяття проби (від початку заливки)	Масова частка, %		Зміна твердості зразків (НВ) протягом старіння							
		Ca	Na	1 година	2 діб	4 діб	7 діб	9 діб	11 діб	150 діб	1 рік
1	початок	0,17	0,21	9,46	15,6	16,5	-	19,9	21,7	20,8	19,5
	1 година	0,17	0,21	8,76	12,2	16,8	-	19,5	19,5	21,7	20,8
	2 години	0,13	0,22	9,86	13,3	17,9	-	19,1	21,7	22,8	20,3
	3 години	0,12	0,18	7,96	8,26	9,1	9,4	9,4	9,4	15,0	18,3
2	початок	0,29	0,25	9,46	16,8	18,7	-	20,8	19,1	21,7	20,8
	1 година	0,25	0,23	10,1	13,9	16,8	-	17,9	17,6	23,7	20,3
	2 години	0,19	0,22	7,96	9,27	13,9	-	15,6	16,5	19,9	19,1
3	початок	0,26	0,25	11,8	16,0	19,1	-	20,8	23,0	23,2	21,7
	1 година	0,20	0,24	8,76	12,2	15,0	-	17,6	19,5	22,7	21,3
	2 години	0,16	0,22	8,84	9,66	11,5	13,6	13,6	16,2	24,3	19,1
	3 години	-	-	8,11	8,93	12,8	12,6	13,0	13,1	-	-

Продовження таблиці 1

Номер плавки	Час взяття проби (від початку заливки)	Масова частка, %		Зміна твердості зразків (НВ) протягом старіння							
		Ca	Na	1 година	2 діб	4 діб	7 діб	9 діб	11 діб	150 діб	1 рік
4	початок	0,26	0,24	10,1	13,9	14,5	-	19,1	20,3	21,7	23,7
	1 година	0,17	0,24	9,46	9,66	10,8	12,5	12,8	14,8	19,1	20,3
	2 години	0,10	0,18	7,96	7,96	9,3	9,1	9,9	9,9	10,1	11,9
	3 години	0,04	0,19	7,96	8,26	9,9	9,9	8,6	9,2	17,6	18,3
5	початок	0,23	0,22	9,66	14,5	19,5	-	19,9	20,3	21,7	21,9
	1 година	0,17	0,22	9,46	14,2	19,1	-	19,5	19,9	21,7	22,2
	2 години	0,14	0,22	10,3	11,2	14,2	-	17,3	18,7	21,7	22,2
	3 години	0,07	0,19	9,1	9,1	9,9	-	10,9	11,7	18,7	18,3

Математичним опрацюванням даних таблиці 1 отримано регресійне рівняння, що описує вплив часу старіння бабіту на твердість сплаву:

$$HB = 16,3944 + 0,1460t + 0,0138t^2 + 0,0021t^3, \quad (12)$$

де НВ – твердість сплаву БК2, отриманого без добавок магнію; t – час зберігання, доба.

У таблиці 2 наведено зміну твердості сплаву БК2, отриманого з додаванням у вторинний сплав магнію. Регресійне рівняння, що описує зміну твердості зразків бабіту, отриманих з добавкою магнію, під час зберігання записується у вигляді:

$$HB^M = 13,9010 + 3,5789t - 0,3456t^2 + 0,0115t^3, \quad (13)$$

де  $HB^M$  – твердість бабіту, отриманого з додаванням магнію; t – час зберігання, доба.

Таблиця 2 – Твердість зразків дослідних плавок із застосуванням магнію залежно від часу старіння

Номер плавки	Час взяття проби	Масова частка, %			Зміна твердості зразків (НВ) протягом старіння						
		Ca	Na	Mg	1 годину	1 доба	5 діб	7 діб	15 діб	35 доби	108 доби
1	0	0,19	0,25	0,013	9,27	11,4	17,3	18,7	21,2	23,7	23,7
	1 година	0,15	0,23	0,013	7,98	11,4	15,3	18,7	20,3	22,3	23,7
	2 години	0,18	0,25	0,012	11,9	14,2	15,0	19,9	20,8	21,2	23,7
	3 години	0,14	0,22	0,005	9,27	10,1	16,5	18,3	19,9	21,7	22,7
	4 години	0,16	0,23	0,016	9,27	10,9	16,6	18,3	19,9	20,3	22,2
	5 годин	0,20	0,23	0,012	11,9	13,0	15,3	17,9	19,5	20,3	23,2
2	0	0,21	0,24	0,009	9,2	11,9	19,1	19,1	19,5	20,3	21,2
	1 година	0,19	0,23	0,019	10,5	11,9	17,9	18,3	19,9	20,8	22,2
	2 години	0,11	0,21	0,005	8,93	8,59	11,5	12,8	14,5	16,8	18,7
	3 години	0,14	0,21	0,007	8,59	9,66	14,5	15,9	19,5	21,7	22,2
	4 години	0,11	0,17	0,001	7,96	7,98	11,1	10,9	11,3	12,5	16,2
						11,3	11,5	10,6	11,9	15,9	

## Продовження таблиці 2

Номер плавки	Час взяття проби	Масова частка, %			Зміна твердості зразків (НВ) протягом старіння						
		Ca	Na	Mg	1 годину	1 доба	5 діб	7 діб	15 діб	35 доби	108 доби
3	0	0,22	0,25	0,016	9,68	10,5	16,8	17,3	18,1	18,7	19,9
	1 година	0,19	0,23	0,029	10,5	8,93	15,6	17,3	19,5	19,9	20,8
	2 години	0,15	0,22	0,007	9,27	10,9	15,6	16,2	20,8	20,3	21,7
	3 години	0,14	0,21	0,011	7,98	8,28	14,5	16,2	18,7	20,8	22,2
	4 години	0,15	0,21	0,010	8,59	10,1	15,6	17,9	18,7	20,8	22,7

У рівнянні (12) значення критерію Фішера:  $F_p=1,22 < F_r=1,70$ . У рівнянні (13) значення критерію Фішера:  $F_p=3,09 < F_r=3,10$ . Критерій Стьюдента  $t_{\alpha 2} = 2,04$ ; середнє квадратичне відхилення  $\sigma_0 = 0,97$ .

Зміну твердості бабіту БК2 залежно від часу старіння наведено на рисунку 1 для зразків, отриманих без добавок магнію, рівняння (12) і з добавками, рівняння (13).

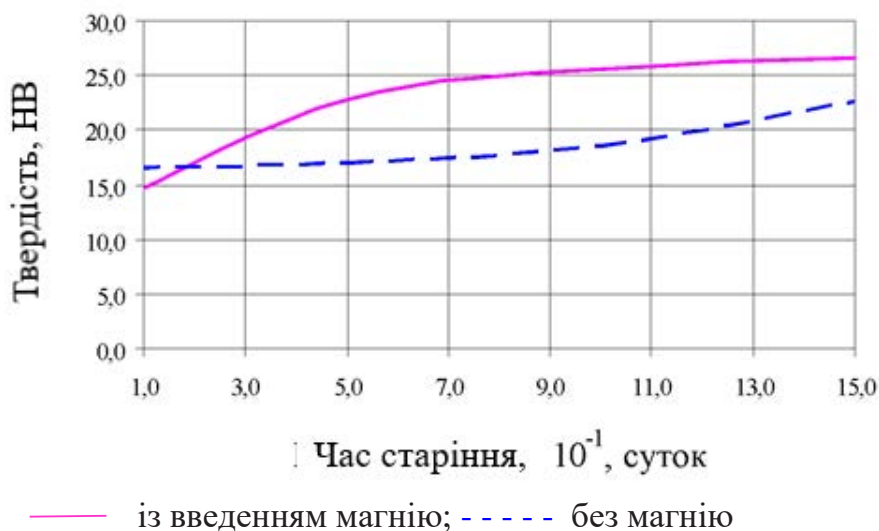


Рисунок 1 – Залежність твердості бабіту БК2 від часу старіння

Як видно з рисунку 1, твердість сплавів, отриманих без добавки магнію, монотонно зростає протягом наведених на графіку 150 діб зберігання, досягаючи приблизно НВ=23. Введення магнію призводить до досягнення твердості НВ=23 через 45 діб зберігання, а через 150 діб твердість збільшується до НВ=27.

Вивчення твердості зразків бабіту при старінні до одного року дало змогу встановити, що добавка магнію сприяє підвищенню цієї характеристики. Так, за рахунок добавки магнію через 80 діб витримки твердість зразків зростає в 1,5 рази, досягаючи НВ=25.

*Вплив хімічного складу на твердість бабіту.* Однією з найважливіших характеристик кальцієвих бабітів слугує твердість, яка залежить від кількості та виду легуючих елементів, а також їхньої можливості утворювати хімічні сполуки. Проведено дослідження сімнадцяти сплавів з різним вмістом легуючих елементів. Твердість зразків визначали в процесі витримки не більше 720 годин.

Хімічний склад сплавів, підданих дослідженню, а також твердість, визначена після витримки протягом заданого проміжку часу, наведено в таблиці 3.



Таблиця 3 – Хімічний склад і твердість сплавів після витримки

Номер сплаву	Масова частка легуючих елементів, %	Твердість (НВ), після витримки, год				
		0,5	1,0	3,0	24,0	720,0
1	2	3	4	5	6	7
1	Ca – 0,15	9,6	9,6	9,7	9,7	11,9
2	Ca – 0,90	10,7	10,8	10,9	11,0	12,0
3	Na – 0,75	9,0	9,5	9,5	10,0	23,0
4	Mg – 0,26	9,1	9,3	9,9	10,2	12,6
5	Ca – 0,15; Sn – 1,80	7,1	10,2	10,6	10,6	13,3
6	Ca – 0,15; Mg – 0,25	10,9	11,1	11,4	11,8	15,9
7	Ca – 0,90; Na – 0,75	26,1	29,3	32,9	35,4	38,0
8	Na – 0,25; Sn – 1,80	8,0	8,4	8,4	8,4	8,1
9	Mg – 0,01; Sn – 1,80	6,9	6,9	7,0	7,8	7,8
10	Mg – 0,05; Sn – 1,80	8,9	8,9	9,2	9,8	13,9
11	Mg – 0,01; Na – 0,25	6,6	6,6	6,6	6,6	6,6
12	Mg – 0,05; Na – 0,25	6,6	6,8	6,9	6,9	6,9
13	Ca – 0,15; Mg – 0,01	10,0	10,3	10,5	10,5	11,0
14	Ca – 0,15; Mg – 0,05	8,2	8,4	8,6	8,8	10,9
15	Ca – 0,25; Na – 0,23 Mg – 0,05; Sn – 1,80	17,7	17,8	18,4	24,2	28,0
16	Ca – 0,02; Na – 0,27 Mg – 0,06; Sn – 1,80	6,9	6,9	7,2	7,7	14,8
17	Ca – 0,13; Na – 0,27 Mg – 0,06; Sn – 1,80	20,2	20,8	21,0	29,0	28,0

Математичним опрацюванням даних таблиці 3 встановлено, що вплив легуючих елементів і тривалості витримки на твердість бабіту оцінюється регресійним рівнянням у вигляді кубічних сплайнів.

$$HB = \sum_{i=1}^N (c_i^0 + c_i^1 \cdot x_1 + c_i^2 \cdot x_1^2), \quad (14)$$

де  $N$  – кількість легуючих елементів і час витримки,  $N=5$ ;  $x_1$  [ $i \in (1,4)$ ] – масова доля лігатури ( $i=1$  для Ca;  $i=2$  для Na;  $i=3$  для Sn;  $i=4$  для Mg);  $x_5$  – час витримки до визначення твердості;  $c_i^e$  – коефіцієнти рівняння регресії (таблиця 4).

Таблиця 4 – Значення коефіцієнтів рівняння регресії (14) для хімічних елементів бабіту

Найменування елементів	№ параметра	$c_i^0$	$c_i^1$	$c_i^2$
Кальцій	1	-5,615	17,865	-1,819
Натрій	2	-1,327	14,233	1,357
Олово	3	0,435	-0,117	0,201
Магній	4	0,314	6,892	1,374
Час витримки, годин	5	1,748	3,390	2,429

Для рівняння (14) розрахункове значення критерію Фішера сягає  $F_p=14,2$ . Табличне значення цього критерію для рівня значущості  $\alpha=0,05$ , ступеня свободи  $f_1=84$  і  $f_2=69$

становить  $F_t=1,48$ . Отже, рівняння (14) адекватно описує експериментальні значення (таблиця 4).

Результати розрахунків за рівнянням (14) для кожного з параметрів подано на рисунку 2.

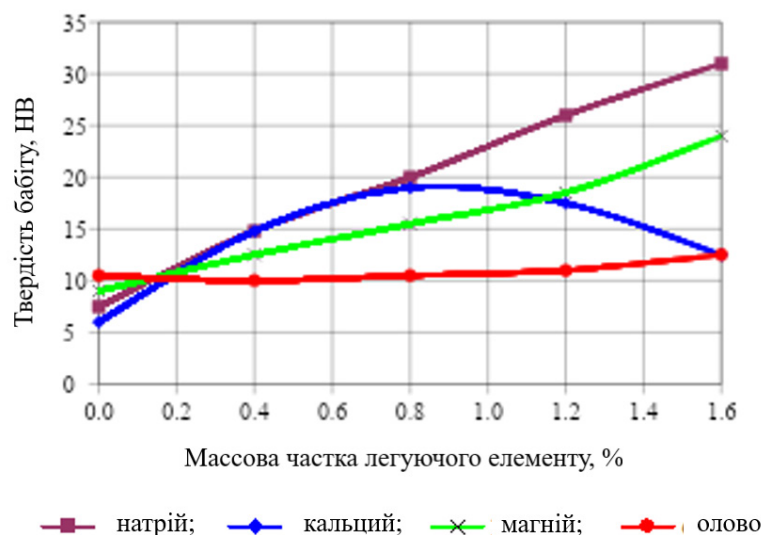


Рисунок 2 – Залежність твердості бабіту від вмісту легувальних елементів

Як видно з рисунку 2, зі збільшенням масової частки натрію і магнію від 0 до 1,6 % твердість зразків зростає у 2,5 – 3,0 рази. Зростання масової частки олова майже не впливає на цей показник. Вплив кальцію характеризується наявністю екстремуму в діапазоні 0,8-1,2%. При цьому твердість зростає в 1,8 раза.

Вплив *хімічного складу на механічні властивості бабіту*. Зі збільшенням частки повернення під час виплавки бабіту відбувається поступове накопичення в сплаві металевих домішок. З метою оцінки впливу цих домішок на якість бабіту проведено комплекс досліджень.

Основним шляхом збільшення міцності властивостей бабіту є його легування. У більшості свинцевих сплавів основним зміцнювачем є сурма, яка утворює велику кількість центрів кристалізації і є модифікатором 1-го роду.

Для оцінки впливу сурми на властивості бабіту БК2 було відлито 5 сплавів. Шихтування сплавів проводилося з розрахунку отримання оптимального складу бабіту БК2, легуваного сурмою в діапазоні 0,1-0,5%. Результати досліджень цих сплавів наведено в таблиці 5.

Таблиця 5 – Хімічний склад і твердість бабіту БК 2 з добавкою сурми

Номер сплаву	Хімічний склад сплаву, %					Значення твердості HV
	Ca	Na	Mg	Sn	Sb	
1	0,10	0,20	0,04	1,9	0,1	5,9
2	0,10	0,20	0,04	1,9	0,2	5,8
3	0,10	0,20	0,04	1,9	0,3	5,8
4	0,10	0,20	0,04	1,9	0,4	5,5
5	0,10	0,20	0,04	1,9	0,5	5,2

З даних таблиці 5 випливає, що введення сурми в сплав призводить до негативних результатів – твердість сплавів у діапазоні 7,2-6,6 HV неприпустима за умовами експлуатації. Зниження твердості пов'язане із взаємодією сурми з лужними металами з утворенням вторинних фаз, які завдяки великій різниці у відносній густині між цими фазами та свинцем спливали в шлак і збіднювали сплав легуючими елементами.

За даними [4], нікель краще за всі інші елементи перешкоджає ліквідації легуючих елементів у свинцевих сплавах. Результати дослідження серії сплавів на основі бабіту БК2 з добавками 0,2 % сурми і 0,01-0,20 % нікелю представлені в таблиці 6.

Таблиця 6 – Хімічний склад і твердість бабіту БК 2 з добавкою сурми та нікелю

Номер сплаву	Хімічний склад сплаву, %						Твердість, НВ
	Ca	Na	Mg	Sn	Sb	Ni	
1	0,10	0,20	0,04	1,9	0,2	0,01	6,9
2	0,10	0,20	0,04	1,9	0,2	0,05	6,9
3	0,10	0,20	0,04	1,9	0,2	0,10	7,0
4	0,10	0,20	0,04	1,9	0,2	0,20	7,2

Аналіз отриманих результатів показує, що в діапазоні 0,05-0,18% нікель має слабкий вплив на ліквідацію легувальних елементів. При цьому візуально відзначено зниження рідинної текучості сплаву в умовах підвищення масової частки нікелю.

У роботі [4] показано, що нікель зумовлює в решітці свинцю підвищення напружень стиснення, які більш зміцнюють твердий розчин, ніж напруження розтягування. З метою перевірки цього твердження проведено дослідження впливу нікелю на властивості бабіту БК2 в умовах відсутності сурми (таблиця 7).

Таблиця 7 – Хімічний склад і властивості бабіту БК2 з добавкою нікелю

Номер сплаву	Хімічний склад, %					Твердість, НВ	Межа міцності на розтягнення, МПа	Ударна в'язкість, МДж/м <sup>2</sup>
	Ca	Na	Mg	Sn	Ni			
1	0,10	0,20	0,04	1,9	0,01	22,3	43,7	0,22
2	0,08	0,18	0,04	2,0	0,05	22,0	45,3	0,30
3	0,11	0,21	0,03	2,0	0,11	23,0	46,4	0,25
4	0,08	0,18	0,03	1,9	0,21	22,5	45,0	0,28

Отримані дані показують, що добавки нікелю в діапазоні 0,01-0,21 % не мають помітного впливу на властивості бабіту БК2.

Мідь у свинцевих сплавах є модифікатором як I-го, так і II-го роду, крім того, вона підвищує напруження стиснення в решітці свинцю. Результати проведених досліджень (таблиця 8) показали, що невеликі добавки міді викликають підвищення міцності бабіту. Однак подальше підвищення масової частки міді понад 0,26% знижує міцність і, особливо, ударну в'язкість.

Таблиця 8 – Хімічний склад і властивості бабіту БК2 з добавкою міді

Номер сплаву	Хімічний склад, %					Твердість, НВ	Межа міцності при розтягуванні, МПа	Ударна в'язкість, МДж/м <sup>2</sup>
	Ca	Na	Mg	Sn	Cu			
1	0,13	0,19	0,01	1,9	0,0015	20,0	45,0	0,34
2	0,13	0,20	0,01	1,9	0,0240	22,2	61,7	0,42
3	0,14	0,22	0,01	1,9	0,0700	18,2	68,5	0,20
4	0,13	0,37	0,02	1,9	0,2600	20,0	63,0	0,21
5	0,09	0,23	0,04	1,7	0,3700	13,9	53,0	0,20
6	0,11	0,29	0,01	1,8	0,3900	18,0	47,0	-

Як було показано в роботі [4], найбільший вплив на властивості міцності бабіту БК2 чинить магній, який є негативним модифікатором II-го роду. Найбільш близькі властивості до магнію за впливом на свинцеві сплави має цинк, який стабілізує структуру і виключає процеси спучування. Дані за дослідними плавками бабіту БК2 з добавкою цинку наведено в таблиці 9.

Таблиця 9 – Хімічний склад і властивості бабіту БК2 з добавкою цинку

Номер сплаву	Хімічний склад, %					Твердість, НВ	Межа міцності при розтягуванні, МПа	Ударна в'язкість, МДж/м <sup>2</sup>
	Ca	Na	Mg	Sn	Zn			
1	0,10	0,22	0,006	1,8	0,14	26,0	56,0	0,39
2	0,13	0,29	0,020	1,8	0,19	23,2	74,0	0,31
3	0,12	0,23	Сліди	1,8	0,23	20,3	64,5	0,25
4	0,11	0,32	Сліди	1,8	0,47	17,0	51,0	0,20

За результатами комплексного дослідження впливу хімічних елементів на механічні характеристики бабіту БК2 методом регресійного аналізу побудовано апроксимацію квадратичними сплайнами за кожним легувальним елементом у вигляді [22]:

$$\theta = \sum_{i=1}^N [a_i + b_i \cdot x_i + c_i \cdot x_i^2], \quad (15)$$

де  $N$  – кількість хімічних елементів, що легують бабіт БК2;  $x_i$  – масова частка легуючого елемента з номером  $i$ ;  $a_i$ ,  $b_i$ ,  $c_i$  – коефіцієнти сплайну для  $i$ -того легувального елемента;  $\theta$  – характеристика бабіту БК2 (межа міцності, твердість, питома в'язкість).

У таблицях 10-13 подано чисельні значення коефіцієнтів сплайнів у залежності (15) для концентрацій легувальних елементів ( $x_i$ ,  $i$  від 1 до 5).

Таблиця 10 – Значення коефіцієнтів у залежності (15) для легуючих хімічних елементів

Легуючий елемент сплаву		Твердість, НВ			Межа міцності на розтягнення, МПа			Ударна в'язкість, МДж/м <sup>2</sup>		
хімічний елемент	позначення	$a_i$	$b_i$	$c_i$	$a_i$	$b_i$	$c_i$	$a_i - 10^2$	$b_i - 10^2$	$c_i - 10^2$
[Ca]	$x_1$	0,057	0,119	0,008	0,147	0,223	0,015	0,032	0,081	0,002
[Na]	$x_2$	0,057	0,119	0,034	0,102	0,223	0,069	0,030	0,081	0,398
[Mg]	$x_3$	0,023	0,049	0,002	0,031	0,084	0,002	0,004	0,010	0,001
[Sn]	$x_4$	1,236	2,594	4,096	2,356	5,148	8,289	1,128	2,834	5,043
[Ni]	$x_5$	0,210	0,449	0,121	0,465	1,040	0,269	0,386	0,946	0,218

Таблиця 11 – Значення коефіцієнтів у залежності (15) для легуючих хімічних елементів

Легуючий елемент сплаву		Твердість, НВ			Межа міцності на розтягнення, МПа			Ударна в'язкість, МДж/м <sup>2</sup>		
хімічний елемент	позначення	$a_i$	$b_i$	$c_i$	$a_i$	$b_i$	$c_i$	$a_i - 10^2$	$b_i$	$c_i - 10^2$
[Ca]	$x_1$	0,050	0,250	0,053	0,214	0,371	0,036	-0,015	0,527	0,129
[Na]	$x_2$	0,049	0,250	-0,175	0,243	0,371	0,510	-0,015	0,525	-1,103
[Mg]	$x_3$	0,035	-0,103	-0,005	0,105	0,120	0,004	-0,012	-0,323	-0,015
[Sn]	$x_4$	0,151	1,587	4,637	2,254	6,662	11,556	-0,214	1,656	7,889
[Cu]	$x_5$	0,056	-2,166	-0,874	1,023	2,223	0,795	-0,356	-7,915	-3,056

Таблиця 12 – Значення коефіцієнтів у залежності (15)  
для легуючих хімічних елементів

Легуючі елементи сплаву		Твердість, НВ			Межа міцності на розтягнення, МПа			Ударна в'язкість, МДж/м <sup>2</sup>		
хімічний елемент	позначення	$a_i$	$b_i$	$c_i$	$a_i$	$b_i$	$c_i$	$a_i - 10^2$	$b_i - 10^2$	$c_i - 10^2$
[Ca]	$x_1$	0,2171	0,2129	0,0316	0,4823	0,6014	0,0866	0,5411	0,3066	0,085
[Na]	$x_2$	0,3124	0,2131	-0,7389	0,4103	0,6015	-0,9816	0,4109	0,3065	-1,5358
[Mg]	$x_3$	0,1735	0,2034	0,0030	0,3452	0,3578	0,0057	0,3851	0,3943	0,0059
[Sn]	$x_4$	0,6541	2,8811	5,1860	1,7441	7,8746	14,174	0,4671	3,9949	7,1909
[Zn]	$x_5$	0,2435	-5,7003	-3,7316	2,3574	-8,4898	-5,7454	0,4152	-11,533	-7,4645

Таблиця 13 – Значення коефіцієнтів у залежності (15)  
для легуючих хімічних елементів

Легуючий елемент сплаву		Твердість, НВ			Межа міцності на розтягнення, МПа			Ударна в'язкість, МДж/м <sup>2</sup>		
хімічний елемент	позначення	$a_i$	$b_i$	$c_i$	$a_i$	$b_i$	$c_i$	$a_i - 10^2$	$b_i - 10^2$	$c_i - 10^2$
[Ca]	$x_1$	0,2087	0,1303	0,0125	0,1850	0,8187	0,1359	0,2615	0,2998	0,0377
[Na]	$x_2$	0,1145	0,1302	0,0463	0,0245	0,8191	0,5873	0,1214	0,2997	0,1752
[Cu]	$x_3$	0,2140	-0,1726	-0,0199	0,8114	1,7117	0,2169	0,0943	-0,0743	0,0045
[Sn]	$x_4$	0,7431	2,4792	4,4104	1,3123	6,7402	12,806	0,8413	3,9135	7,4357
[Ni]	$x_5$	0,0245	0,0847	0,0253	1,2143	-6,2338	-1,9795	0,7413	-2,7952	-0,8199

Зіставлення отриманих результатів дає можливість зробити висновок, що основне зміцнення можна отримати за рахунок легування цинком. Максимальна міцність сплаву з масовою часткою цинку 0,20 %, не залежить ні від наявності міді, ні від наявності магнію. Однак це справедливо для сплавів із масовою часткою міді не більше 0,05 %, оскільки за більшої масової частки міді і міцність, і ударна в'язкість починають різко знижуватися. Тому доцільно знизити допустиму масову частку вмісту міді від 0,20 до 0,05 %.

Зіставлення значень лінійного і масового зносу бабіту, визначених в експериментах, показало хорошу збіжність отриманих результатів.

Таблиця 14 – Лінійний і масовий знос кальцієвих бабітів

№ сплаву	Хімічний склад, %								Тиск МПа	Знос	
	Ca	Na	Mg	Sn	Sb	Ni	Cu	Zn		Лінійний, мкм/км	Масовий г/мм <sup>2</sup> км
1	0,1	0,2	0,04	1,9	0,1	-	-	-	1,0	0,272	0,027
									1,5	0,492	0,048
2	0,1	0,2	0,04	1,9	0,2	0,01	-	-	1,0	0,240	0,025
									1,5	0,403	0,040
3	0,1	0,2	0,04	1,9	-	0,01	-	-	1,0	0,149	0,020
									1,5	0,284	0,030
4	0,1	0,23	-	1,9	-	-	0,02	0,003	1,0	0,158	0,017
									1,5	0,164	0,027



Як впливає з таблиці 14, найменшого зносу досягнуто для сплаву номер 1, що містить цинк і має найбільшу твердість. Максимальне зношування мають сплави, леговані сурмою і сурмою з нікелем.

З аналізу даних таблиці 14 випливає, що найменший знос встановлений у сплаві номер 4, що містить цинк і має найбільшу твердість. Максимальний знос відповідає сплавам, легованим сурмою і сурмою з нікелем.

### Бібліографічний перелік

1. Хрущов М.М. Классификация условий и видов изнашивания деталей машин. *Трение и износ в машинах*, 1953. Вып. VIII. С. 5 – 17.
2. Буше Н.А. Подшипниковые сплавы для подвижного состава Москва : Транспорт, 1967. 222 с.
3. Буше Н.А. Цветные металлы и сплавы для железнодорожного транспорта. *Труды ВНИИЖТ. Транспжелдориздат*, 1969. Вып. 277. С. 7-12.
4. Seitz F. L'Etat solide, *Jugt Intern Phys Solvay R. Stoops*, 1952. P. 401.
5. Захарова М.И. Атомно-кристаллическая структура и свойства металлов и сплавов. Москва : Наука, 1972. 216 с.
6. Буше Н.А. Замена высокооловянных баббитов сплавом на свинцовой основе для заливки тонкостенных подшипников. *Экономия и заливка цветных металлов*, 1953. С.18-24.
7. Бочвар А.М. Металловедение. Москва : Metallurgizdat, 1956. 495 с.
8. Зайцев А.К. Основы учения о трении, износе и смазке машин. Москва : Машгиз, 1948. 280 с.
9. Славинский М.П. Физико-химические свойства элементов. Москва : Metallurgizdat, 1952. 763 с.
10. Вайнер К. Термодинамика сплавов. Москва : Metallurgizdat, 1957. 179 с.
11. ДСТУ 1209-90. Баббиты кальциевые в чушках. Технические условия.
12. Буше Н.А. Антифрикционные сплавы для подшипников скольжения. *Вестник машиностроения*, 1981, № 12. С. 7 – 10.
13. Буше Н.А. Исследование антифрикционных сплавов подшипников подвижного состава. *Труды ВНИИ железнодорожного транспорта*, 1956. Транспжелдориздат. Вып. 112. С. 2-13.
14. Вол А.Е., Коган И.К. Строение и свойства двойных металлургических систем. Москва : Наука, 1979. Т.4. 578 с.
15. Беленький А.Ф., Буше Н.А. Работа подшипников коленчатого вала при обводнении дизельного масла. *Труды ЦНИИ МПС. Транспорт*, 1968. Вып. 359. С. 146 – 151.
16. Яцыно А.Т., Цуркан И.Г. Некоторые результаты оценки характера режима трения вагонных подшипников скольжения. *Труды ЦНИИ МПС, Способы улучшения смазок железнодорожного транспорта*, 1970. Транспорт. Вып. 400. С. 136-141.
17. Захаров С.М., Загорянский Ю.А. Влияние разрушений антифрикционного слоя на гидродинамические характеристики подшипников дизеля. *Труды ЦНИИ МПС*, 1972. Транспорт. Вып. 473. С. 15 – 17.
18. Захаров С.М., Загорянский Ю.А. Эффективность применения безканавочных вкладышей подшипников на дизелях типа. *Вестник ЦНИИ МПС*, 1967. № 4. С. 38.
19. Рудницкий Н.М. Выносливость материалов для подшипников скольжения автомобильных двигателей. Москва : Машгиз, 1955. 56 с.
20. Тяпкин Ю.Д., Гаврилов А.В. Старение сплавов. *Итоги науки и техники. Металловедение и термическая обработка металлов*, 1974. Т.8. С. 64.
21. Schneider A. Darstellung und Erklärungsansätze des Investitionsverhaltens industrieller Unternehmen., Erlangen – Nürnberg, 1976. P.200.
22. Иванова В.С., Гуревич С.Е., Коньев И.М. Усталость и хрупкость металлических материалов. Наука, 1968. 215 с.
23. Фільченков О.С., Грицай В.П., Скачков В.О., Иванов В.І. Моделювання процесу зношення підшипників ковзання на основі бабіту. *Вісник ЧДТУ*, 2008. № 3. С.152.

### References

1. Khrushchev M.M. Classification of conditions and types of wear of machine parts. Friction and wear in machines, 1953. Issue VIII. Pp. 5–17.
2. Bushe N.A. Bearing alloys for rolling stock Moscow: Transport, 1967. 222 p.
3. Bushe N.A. Non-ferrous metals and alloys for railway transport. Proceedings of the All-Russian Research Institute of Railway Transport. Transpzheldorizdat, 1969. Issue 277. Pp. 7-12.
4. Seitz F. L'Etat solide, *Jugt Intern Phys Solvay R. Stoops*, 1952. P. 401.
5. Zakharova M.I. Atomic-crystalline structure and properties of metals and alloys. Moscow: Nauka, 1972. 216 p.

6. Bushe N.A. Replacement of high-tin babbitts with a lead-based alloy for filling thin-walled bearings. Saving and filling of non-ferrous metals, 1953. Pp.18-24.
7. Bochvar A.M. Metallurgy. Maskva: Metallurgizdat, 1956. 495 p.
8. Zaitsev A.K. Fundamentals of the theory of friction, wear and lubrication of machines. Moscow: Mashgiz, 1948. 280 p.
9. Slavinsky M.P. Physical and chemical properties of elements. Moscow: Metallurgizdat, 1952. 763 p.
10. Weiner K. Thermodynamics of alloys. Moscow: Metallurgizdat, 1957. 179 p.
11. DSTU 1209-90. Calcium babbitts in ingots. Technical conditions.
12. Bushe N.A. Antifriction alloys for plain bearings. Bulletin of mechanical engineering, 1981, No. 12. P. 7 – 10.
13. Bushe N.A. Study of antifriction alloys of rolling stock bearings. Proceedings of the All-Russian Research Institute of Railway Transport, 1956. Transzheldorizdat. Issue 112. Pp. 2-13.
14. Vol A.E., Kogan I.K. Structure and properties of binary metallurgical systems. Moscow: Nauka, 1979. Vol.4. 578 p.
15. Belenkiy A.F., Bushe N.A. Operation of crankshaft bearings with water contamination of diesel oil. Proceedings of the Central Research Institute of the Ministry of Railways. Transport, 1968. Issue 359. Pp. 146-151.
16. Yatsino A.T., Tsurkan I.G. Some results of the evaluation of the nature of the friction mode of wagon plain bearings. Proceedings of the Central Research Institute of the Ministry of Railways, Methods for Improving Lubricants of Railway Transport, 1970. Transport. Issue 400. Pp. 136-141.
17. Zakharov S.M., Zagoryansky Yu.A. Effect of destruction of antifriction layer on hydrodynamic characteristics of diesel bearings. Proceedings of the Central Research Institute of the Ministry of Railways, 1972. Transport. Issue 473. Pp. 15–17.
18. Zakharov S.M., Zagoryansky Yu.A. Efficiency of using grooveless bearing liners on diesel engines of the type. Bulletin of the Central Research Institute of the MPS, 1967. No. 4. P. 38.
19. Rudnitsky N.M. Endurance of materials for plain bearings of automobile engines. Moscow: Mashgiz, 1955. 56 p.
20. Tyapkin Yu.D., Gavrilov A.V. Aging of alloys. Results of science and technology. Metal science and heat treatment of metals, 1974. V.8. P. 64.
21. Schneider A. Darstellung und Erklärungsansätze des Investitionsverhaltens industrieller Unternehmern., Erlangen – Nürnberg, 1976. P.200.
22. Ivanova V.S., Gurevich S.E., Konyev I.M. Fatigue and fragility of metallic materials. Science, 1968. 215 p.
23. Filchenkov O.S., Gritsai V.P., Skachkov V.O., Ivanov V.I. Modeling the wear process of forged bearings based on babbitt. Bulletin of ChDTU, 2008. No. 3. P. 152.

**Skachkov Viktor**, professor, doctor of technical sciences, Zaporizhia national university, ORCID: 0000-0002-4447-4641

**Karpenko Hanna**, candidate of technical sciences, associate professor of the department, Zaporizhia national university, ORCID: 0000-0003-3504-0283

**Kurinyi Maksym**, PhD student, Zaporizhia national university, ORCID: 0009-0004-5752-8954

**Hnatyshak Andrii**, PhD student, Zaporizhia national university, ORCID: 0009-0007-3248-1733

### **INFLUENCE OF COMPONENTS OF LIGATURES ON THE FUNCTIONAL CHARACTERISTICS OF CALCIUM BABBITTS**

The work is devoted to the processes of creating a high-quality babbitt layer of bearings due to the use of a large amount of primary babbitt in the charge. The formation of a large amount of waste in the production of bronze-babbitt liners reduces technical and economic indicators, worsens the environmental situation at the enterprise and in the region. In this regard, it is necessary to create a technology that uses a larger amount of calcium babbitt waste.

Bronze Babbitt liners are the most common design of crankshaft bearings of diesel locomotives. The traditional production technology of bronze-babbitt liners of sliding bearings involves casting an alloy based on calcium babbitt into the bronze frame. Usually, pouring is carried out centrifugally, and the charge is melted in the crucible of an electric furnace.

---

The main task of the research is aimed at a comprehensive study of the functional properties of calcium babbitts and the assessment of the influence of each babbitt component on the quantitative characteristics of quality indicators, including the processes of aging, wear, formation of hardness, mechanical strength and structural defects.

The main operational characteristics of bronze-babbitt liners of sliding bearings (hardness, impact toughness, tensile strength, wear intensity) depend on a whole set of structural parameters, technological features of production and chemical composition. At the same time, the influence of each individual factor is significantly non-linear.

The study of the hardness of babbitt samples after aging up to one year made it possible to establish that the addition of magnesium helps to increase this characteristic. Thus, due to the addition of magnesium, after 80 days of exposure, the hardness of the samples increases by 1.5 times, reaching HB=25.

Mathematical processing of the obtained data established that the influence of alloying elements and duration of exposure on the hardness of babbitt is estimated by a regression equation in the form of cubic splines. Based on the results of a comprehensive study of the influence of chemical elements on the mechanical characteristics of BK2 babbitt, an approximation by quadratic splines for each alloying element was constructed using the regression analysis method.

Key words: calcium babbitt, sliding bearing, hardness, yield strength, viscosity, mechanical strength.