

PHASE TRANSFORMATIONS

PACS numbers: 65.40.De, 81.30.Fb, 81.40.Np, 81.70.Bt, 83.10.Tv, 83.85.Ns, 89.20.Kk

Вивчення паралельних процесів, які виникають у безперервно литій заготівці під час її твердіння

О. М. Хорошилов, О. С. Подоляк, О. І. Пономаренко*

Українська інженерно-педагогічна академія,
вул. Університетська, 16,
61003 Харків, Україна
*Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»,
вул. Кирпичова, 2,
61002 Харків, Україна

У статті наведено результати дослідження паралельних процесів, що відбуваються у заготівці під час зміни технологічних параметрів безперервного лиття. Виявлено наявність додаткового теплофізичного процесу в заготівці — швидкості росту товщини її корки ξ зі зміною частоти її руху $f_{\text{рух}}$, звідки випливає, що показники ξ є додатковим паралельним процесом. Визначено, що ξ і коефіцієнт твердіння $k_{\text{ТВ}}$ є однією і тією ж теплофізичною величиною, звідки випливає, що $k_{\text{ТВ}}$, як і ξ , не можуть бути постійними величинами, тому що вони знаходяться з тривалістю твердіння $t_{\text{ТВ}}$ в гіперболічній залежності; $k_{\text{ТВ}} = \text{const}$ може бути тільки за умови, що приведений радіус заготівки $R_{\text{пр}} = \text{const}$ для визначення $k_{\text{ТВ}}$ одного і того самого металу або стопу; лише після умови $R_{\text{пр}} = \text{const}$ можна порівнювати коефіцієнти $k_{\text{ТВ}}$ для різних металів та стопів. Показано, що напрямок руху заготівки під час подолання сили тертя спокою (СТС) впливає на взаємовідносини показників ξ та параметра пошкоджуваності ω відносно показників механічних властивостей $\sigma_{\text{ТЧАС}}$ (часового опору розриву) заготівки

Corresponding author: Oleh Mykolayovych Khoroshylov
E-mail: Olegkhoroshilov2020@gmail.com

Ukrainian Engineering Pedagogics Academy,
16 Universytetska Str., UA-61003 Kharkiv, Ukraine
*National Technical University 'Kharkiv Polytechnic Institute',
2 Kyrpychova Str., UA-61002 Kharkiv, Ukraine

Citation: O. M. Khoroshylov, O. S. Podolyak, and O. I. Ponomarenko, Study of Parallel Processes Arising in Continuous Cast Billet During Its Solidification, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **44**, No. 2: 175–190 (2022) (in Ukrainian).
DOI: [10.15407/mfint.44.02.0175](https://doi.org/10.15407/mfint.44.02.0175)

зі зміною $f_{\text{рух}}$: показники $f_{\text{рух}}$ знаходяться у прямій пропорційній залежності з показниками ξ і не залежать від зміни напряму руху заготовки під час подолання СТС; у випадку поступального руху заготовки процеси ξ , ω та $f_{\text{рух}}$ знаходяться в оберненій пропорційній залежності відносно показників $\sigma_{\text{тчас}}$; у випадку реверсивного руху заготовки процеси ξ , ω та $f_{\text{рух}}$ знаходяться в прямій пропорційній залежності до $\sigma_{\text{тчас}}$; у випадку реверсивного руху заготовки спостерігається зниження параметра пошкоджуваності заготовки в циклі, що дозволяє підвищити показники $\sigma_{\text{тчас}}$. Показано, що якщо $f_{\text{рух}} = \text{const}$, то зміна швидкості $V_{\text{рух}}$ і тривалість руху $t_{\text{рух}}$ заготовки в циклі впливають тільки на параметр пошкоджуваності ω і відповідно на механічні властивості $\sigma_{\text{тчас}}$ заготовки. Показники ω і $\sigma_{\text{в}}$ завжди мають обернені пропорційні залежності незалежно від напряму руху заготовки під час подолання СТС.

Ключові слова: коефіцієнт твердіння, швидкість зростання товщини корки заготовки.

The paper reports the results of a study of the parallel processes occurring in the billet during the time of changes in the continuous casting process parameters. As found, due to a change in the rate of movement of the billet f_{mov} , there are parallel changes in rheological (damage parameter ω) and mechanical properties (ultimate tensile strength σ_{TS}) processes that occur in the billet. As revealed, the additional thermophysical process exists in the billet such as the growth rate of the thickness ξ of the billet crust under variations in f_{mov} . It follows there from that the values of ξ represent an additional parallel process. A found, the ξ and the solidification coefficient k_{sol} are the same thermophysical value, whence it follows that k_{sol} has not a constant value, but depends on the time of solidification or on the reduced thickness of the billet R_{red} ; $k_{\text{sol}} = \text{const}$ can only be under the conditions $R_{\text{red}} = \text{const}$ to determine the k_{sol} of the same metal or alloy; only after that the k_{sol} values for various metals and alloys can be compared. As revealed, the direction of movement while overcoming the static friction force (SFF) affects the investigated properties of the billet: the values of the process parameters of f_{mov} are in direct proportion to the values of the thermophysical properties of the billet of ξ , both under the translational and reverse movement of the billet while overcoming the static friction force with the translational movement of the billet, the values of the mechanical properties σ_{TS} of the billets are in inverse proportion to the values of the investigated processes such as ξ , ω , and f_{mov} ; with the reverse movement of the billet, the values of the processes ξ , ω , and f_{mov} are in direct proportion to the values of the mechanical properties σ_{TS} of the billets; with the reverse movement of the billet, a decrease in the damage parameter of the billet in the cycle is observed, which makes it possible to increase the values of σ_{TS} . As shown, the values of the mechanical properties of σ_{TS} of the billets can simultaneously affect two process parameters, the speed of movement V_{mov} and the time of movement t_{mov} of the billet in the cycle at $f_{\text{mov}} = \text{const}$. As revealed, the direction of movement of the billet while overcoming SFF is a trigger to start the process of reducing the damage parameter in the billet during the transition from translational to reverse movement. As shown, if the following parallel processes of f_{mov} , ξ and σ_{TS} are in direct proportion, then it is possible to predict the values of σ_{TS} by using both the values

of f_{mov} and ξ .

Key words: solidification coefficient of the billet, growth rate of the thickness of the crust of the billet.

(Отримано 16 квітня 2021 р.; остаточн. варіант — 12 листопада 2021 р.)

1. ВСТУП

Як модель для визначення швидкості повзучості і швидкості пошкоджуваності в конструкційних матеріалах прийнята система рівнянь [1, 2]:

$$\dot{c} = B \frac{\sigma^n}{(1 - \omega)^m}, \quad (1)$$

$$\dot{\omega} = D \frac{\sigma^n}{(1 - \omega)^m}, \quad \omega(0) = 0, \quad \omega(t_*) = \omega, \quad (2)$$

де \dot{c} — швидкість повзучості, $\dot{\omega}$ — швидкість пошкоджуваності, B , D , n , m — константи.

У роботах [3] проведено огляд і класифікацію відомих моделей для визначення пошкоджуваності. Нині модель (1) широко застосовують для моніторингу реологічного стану конструкційних матеріалів [4, 5].

У роботі [6] описано метод підвищення механічних властивостей металів і стопів за рахунок знакозмінного руху п'єзоелементу.

У роботі [7] показано методику визначення зусиль, які діють на безперервно литу заготовку, що знаходиться в температурному інтервалі кристалізації.

У роботі [8] показано результати розрахунків параметра пошкоджуваності для частоти руху заготовки за певних експериментально визначених зусиль, що діють у заготовці.

У роботі [9] розглянуто питання заходів підвищення безпеки силового навантаження конструкційних матеріалів. Для визначення часу твердіння заготовки обрано залежність, що пов'язує зміну товщини корки заготовки з часом [10–12]:

$$\xi = k\sqrt{t} = k_{\text{TB}}\sqrt{t_{\text{TB}}}, \quad (3)$$

де ξ — товщина корки заготовки, м, t_{TB} — тривалість твердіння, с, k_{TB} — емпіричний коефіцієнт твердіння, м/с^{0,5}.

Здиференціювавши (3), отримуємо:

$$\frac{d\xi}{dt} = \frac{k_{\text{TB}}}{2\sqrt{t}}. \quad (4)$$

Однак, автори роботи [12] не стали застосовувати (4) для визначення швидкості твердіння корки заготовки, а підтримали думку авторів робіт [13, 14] в питанні «...о несостоятельности данного уравнения, особенно для описания начального периода затвердевания ...» так, як «... в начальный момент, когда время стремится к нулю — скорость затвердевания стремится к бесконечности».

У роботах [10–12] не було досліджено змінення швидкості зростання товщини корки заготовки за різної тривалості твердіння, тому необхідно висвітлити це питання.

У роботі [12] застосовували методику визначення глибини лунки рідкої фази методами виливання, однак автори роботи не визначили коефіцієнт твердіння бронзи марки БрО5Ц5С5.

Метою роботи є дослідження зміни паралельних процесів у заготовці, які відбуваються внаслідок дії збурювальних факторів, одного або декількох технологічних параметрів процесу безперервного лиття.

Завданням роботи є:

1. Розробити методику та визначити коефіцієнт твердіння мідних стопів на основі експериментальних даних, наведених в технічній літературі.

2. Визначити наявність декількох одночасних паралельних процесів у заготовці у випадку зміни таких технологічних параметрів безперервного лиття $V_{рух}$, $f_{рух}$, $t_{рух}$ та поступального і реверсивного напрямків руху заготовки під час подолання сили тертя спокою (СТС).

3. Показати, що швидкість зростання товщини корки заготовки пов'язана з частотою її руху та є показником додаткового паралельного процесу у заготовці.

4. Встановити процеси, які знаходяться у прямій пропорційній залежності з тимчасовим опором розриву $\sigma_{тчас}$ у випадку поступального та реверсивного рухів заготовки під час подолання СТС.

5. З'ясувати, чи є коефіцієнт твердіння $k_{ТВ}$ сталою величиною та чи є коефіцієнт твердіння $k_{ТВ}$ і швидкість зростання корки заготовки ξ теплофізичною властивістю заготовки.

6. Визначити, за яких умов можна порівнювати показники $k_{ТВ}$ різних металів та стопів.

7. Визначити вплив напрямку руху заготовки під час подолання сили тертя спокою на зміну показників паралельних процесів.

8. Показати, на які паралельні процеси одночасно впливають швидкість $V_{рух}$ і тривалість руху $t_{рух}$ заготовки за умови $f_{рух} = const$.

Паралельні процеси — це процеси одночасної зміни декількох різних властивостей матеріалу безперервно литої заготовки, які відбуваються під дією збурювальних факторів технологічних параметрів.

2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ТА ТЕОРЕТИЧНІ МЕТОДИКИ

2.1. Методика визначення коефіцієнта твердіння заготовки з бронзи марки БрО5Ц5С5 за експериментальними даними з джерела [12]

Суть даної методики полягає в наступному.

1. Визначимо глибину лунки рідкої фази для заготовки (рис. 1). Глибину лунки рідкої фази (h) можемо визначити за співвідношенням з діаметром (h/D) (рис. 1). Отримуємо, що глибина лунки для заготовки $D = 0,06$ м становить $h = 0,106$ м.

2. Визначимо середні швидкості руху для заготовок з бронзи марки БрО5Ц5С5.

3. Тривалість наскрізного твердіння заготовки визначимо за формулою:

$$t_{\text{ТВ}} = \frac{h}{V_{\text{CP}}}, \quad (5)$$

де h — глибина лунки рідкої фази, V_{CP} — середня швидкість руху заготовки у кристалізаторі, $t_{\text{ТВ}}$ — час повного твердіння заготовки, с.

4. Визначимо коефіцієнт твердіння заготовки за умови, що корка заготовки буде дорівнювати її радіусу:

$$k_{\text{ТВ}} = \frac{R_{\text{пр}}}{\sqrt{t_{\text{ТВ}}}}, \quad (6)$$

де $k_{\text{ТВ}}$ — коефіцієнт твердіння бронзи марки БрО5Ц5С5, $R_{\text{пр}}$ — приведений радіус заготовки, що досліджується, $t_{\text{ТВ}}$ — час наскрізного твердіння заготовки до утворення лунки, с.



Рис. 1. Результати експериментальних досліджень з визначення глибини лунки рідкої фази заготовок діаметром 0,06 м з бронзи марки БрО5Ц5С5, одержаних шляхом виливання рідкої фази [12]: 1 — ерозія корки заготовки на верхній твірній лінії.

Fig. 1. Experimental findings to determine the depth of the hole of the liquid phase of the billets with a diameter of 0.06 m from БрО5Ц5С5 bronze, obtained by casting the liquid phase [12]: 1—erosion of the crust of the billet on the upper generator.

ТАБЛИЦЯ 1. Експериментальні дані, отримані з роботи [12] під час виробництва заготовки діаметром 0,06 м.

TABLE 1. Experimental data obtained in the paper [12] when manufacturing a billet with a diameter of 0.06 m.

Діаметр заготовки, що виготовляється D , м	Середні швидкості руху заготовки	
	V_{cp} , м/хв	V_{cp} , 10^{-3} м/с
0,06–0,065	0,20–0,47	3,3–7,8

ТАБЛИЦЯ 2. Розрахунок коефіцієнтів твердіння за умови, що для різних швидкостей руху заготовки будемо враховувати експериментальне значення $h = \text{const}$ [12].

TABLE 2. Calculation of solidification coefficients provided that for different speeds of movement of the billet the experimental value $h = \text{const}$ is taken into account [12].

Діаметр заготовки D , м	Глибина лунки рідкої фази h , м	Середня швидкість заготовки V_{cp} , 10^{-3} м/с	Тривалість повного твердіння заготовки t_{TB} , с (за формулою (5))	Коефіцієнт повного твердіння k_{TB} , 10^{-3} м/с 0,5 (за формулою (6))
0,060–0,065	0,106	3,3	33,0	5,2
	0,106	7,8	14,0	8,0

5. Розрахуємо k_{TB} за умови, що для кожного значення швидкостей заготовки з табл. 1, глибина лунки матиме фіксоване значення $h = \text{const}$ (рис. 1) [12].

З таблиці 2 випливає наступне: для заготовок, що мають діаметр в інтервалі 0,06–0,065 м та $h = 0,106$ м [12], k_{TB} повинен бути в інтервалі $5,2 \text{ м/с}^{0,5} < k_{TB} < 8,0 \text{ м/с}^{0,5}$.

Таким чином, розроблено методику та визначено коефіцієнт твердіння заготовки діаметром 0,06–0,065 м за даними роботи [12].

2.2. Методика визначення зміни швидкості зростання товщини корки заготовки за час циклу за різних частот її руху

Визначимо швидкість зростання товщини корки заготовки впродовж циклу її руху на основі інтегрування рівняння (4):

$$\dot{\xi} = \frac{k_{TB}}{2\sqrt{t}} \Big|_{t=0}^{t=t_{\text{пyx}}} . \quad (7)$$

З рівнянь (4) та (7) випливає, що показники $\dot{\xi}$ мають бути визначені тільки за умови $k_{TB} = \text{const}$ для конкретного $R_{\text{пр}} = \text{const}$.

Коефіцієнт кратності зростання товщини корки заготовки для циклів з різною тривалістю буде виглядати так:

$$K_{\xi_i} = \frac{\xi_i}{\xi_{i-1}}, \quad (8)$$

де K_{ξ_i} — коефіцієнт кратності зростання товщини корки заготовки — це співвідношення швидкості зростання товщини корки заготовки (ξ_i) для поточного значення частоти руху заготовки ($f_{\text{pyx}i}$) до швидкості зростання товщини корки заготовки (ξ_{i-1}) для попереднього значення ($f_{\text{pyx}i-1}$).

Поточна частота руху заготовки f_{pyx} та тривалість руху t_i її у циклі для розмірності (хв^{-1}) пов'язані рівнянням:

$$t_{\text{ц}} = 60/f_{\text{pyx}}. \quad (9)$$

Підставивши (9) в (8), одержуємо:

$$K_{\xi_i} = \frac{\xi_i}{\xi_{i-1}} = \sqrt{\frac{f_{\text{pyx}i-1}}{f_{\text{pyx}i}}} = \sqrt{\frac{t_{\text{ц}i}}{t_{\text{ц}i-1}}}. \quad (10)$$

З рівнянь (8) і (10) випливає, що коефіцієнт кратності зростання товщини корки заготовки K_{ξ_i} може бути визначеним також у разі застосування співвідношень тривалості ($t_{\text{ц}}$) та частоти (f_{pyx}) заготовки. У таблиці 3 наведено розрахунок швидкості зростання товщини корки заготовки діаметром 0,06 м з бронзи марки БрО5Ц5С5 за умови $2,5 \text{ хв}^{-1} < f_{\text{pyx}} < 7,5 \text{ хв}^{-1}$.

З формули (3) та з табл. 3 випливає, що розмірність швидкості зростання товщини корки заготовки (ξ) та коефіцієнту $k_{\text{тв}}$ мають

ТАБЛИЦЯ 3. Зміна швидкості зростання товщини корки заготовки діаметром 0,06 м з бронзи марки БрО5Ц5С5 за різної частоти її руху.

TABLE 3. Variations in the growth rate of the thickness of the crust of a billet with a diameter of 0.06 m made of БрО5Ц5С5 bronze at different rates of movement.

Частота руху заготовки $f_{\text{pyx}i}$, хв^{-1}	Тривалість циклу твердіння $t_{\text{ц}i}$, с	Товщина корки за час тривалості циклу ξ , м (за формулою (3))	Швидкість зростання товщини корки заготовки ξ , $\text{м}/\text{с}^{0,5}$ (за формулою (7))	Коефіцієнт кратності зростання товщини корки K_{ξ_i} , разів (за формулою (10))
2,5	24	0,0363	0,000756	1,0
5,0	12	0,0257	0,00107	1,41
7,5	8	0,0209	0,00131	1,73

однакові показники. Це свідчить про те, що вини мають бути однією теплофізичною властивістю заготовки.

3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

3.1. Обговорення характеру зміни паралельних процесів, що відбуваються у безперервно литій заготовці під дією частоти її руху ($f_{\text{рух}}$)

Будемо обговорювати зміни паралельних процесів: ξ , параметра пошкоджуваності ω , $\sigma_{\text{тчас}}$ зі зміною $f_{\text{рух}}$ та $V_{\text{рух}} = \text{const}$ і для різних напрямків руху заготовки під час подолання сили тертя спокою.

На рисунку 2 показано вплив зміни технологічних параметрів на процеси, що відбуваються у заготовці за умов поступального руху заготовки під час подолання СТС і за $V_{\text{рух}} = \text{const}$.

На рисунку 2 $K_1 = K_{\xi}$ з рівняння (10). З рисунку 2 випливає, що у разі збільшення $f_{\text{рух}}$ за умов поступального руху заготовки коефіціє-

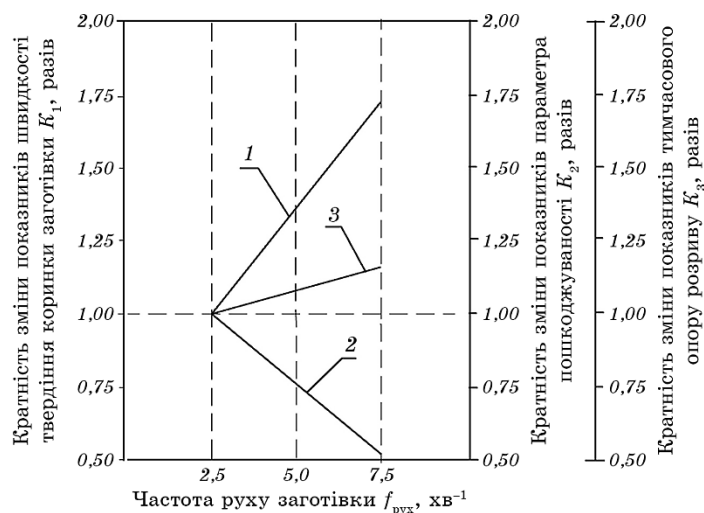


Рис. 2. Кратність зміни показників процесів у разі поступального руху заготовки: 1 — кратність зростання K_1 товщини корки заготовки ξ , разів; 2 — кратність зростання K_2 показників параметра пошкоджуваності ω , разів; 3 — кратність зміни K_3 показників тимчасового опору на розтягання $\sigma_{\text{тчас}}$, разів.

Fig. 2. Multiplicity factors of variations in the values of processes under the translational movement of the billet: 1—multiplicity factor of growth K_1 in the thickness of the crust of the billet ξ , times; 2—multiplicity factor of increase K_2 in the values of damage parameter ω , times; 3—multiplicity factor of variations K_3 in the values of ultimate tensile strength $\sigma_{\text{тчас}}$, times.

нти кратності K_1 та K_2 знаходяться у оберненій пропорційній залежності до коефіцієнта кратності K_3 .

На рисунку 3 показано залежності, одержані для випадку реверсивного руху заготовки під час подолання СТС і за $V_{\text{рух}} = \text{const}$. Видно, що зі збільшенням $f_{\text{рух}}$ у разі реверсивного руху заготовки коефіцієнти кратності K_1 , K_2 зміни показників процесів ξ , ω знаходяться у прямій пропорційній залежності до коефіцієнта K_3 .

Аналіз залежностей 1, представлених на рис. 2 і 3, показав наступне:

– значення показників ξ знаходяться у прямій пропорційній залежності з показниками $f_{\text{рух}}$ і не залежать від напрямку руху заготовки за час подолання сили тертя спокою;

– той факт, що показник ξ залежить від $f_{\text{рух}}$, є доказом наявності додаткового паралельного процесу у заготівці;

– показники властивостей заготовок $\sigma_{\text{тчас}}$ і ω як у разі поступального, так і у разі реверсивного рухів заготовки за час подолання СТС знаходяться між собою у оберненій пропорційній залежності.

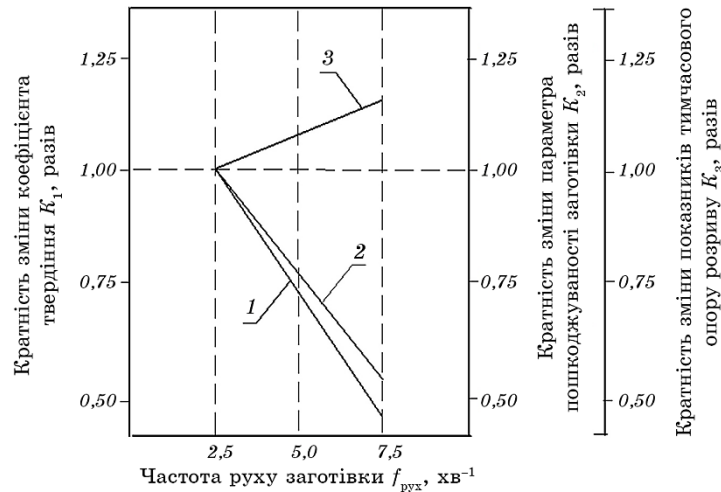


Рис. 3. Кратність зміни показників процесів у разі реверсивного руху заготовки: 1 — кратність зростання K_1 товщини корки заготовки, разів; 2 — кратність зменшення K_2 показників параметра пошкоджуваності, разів; 3 — кратність зміни показників K_3 тимчасового опору на розтягування, разів.

Fig. 3. Multiplicity factors of variations in the values of processes under the reverse movement of the billet: 1—multiplicity factor of growth K_1 in the thickness of the crust of the billet, times; 2—multiplicity factor of increase K_2 in the values of damage parameter, times; 3—multiplicity factor of variations K_3 in the values of ultimate tensile strength, times.

3.2. Обговорення характеру зміни параметра пошкоджуваності, який залежить від швидкості та тривалості руху заготівки

Під час даного обговорення ми торкнемося зміни показників $V_{\text{рух}}$, ω та $t_{\text{рух}}$ у разі поступального та реверсивного рухів заготівки під час подолання сили тертя спокою за умови, що $f_{\text{рух}} = \text{const}$.

На рисунках 4 та 6 наведено подвійний вплив на параметр пошкоджуваності ω двох технологічних факторів $V_{\text{рух}}$ та $t_{\text{рух}}$. Методики розрахунків ω для створення рис. 5 та 7 описані у роботах [8]. Експериментальні випробування виконували за нормативними документами ISO/R-203, ISO/R-204.

З роботи [1] застосуємо формулу впливу швидкості руху $V_{\text{рух}}$ заготівки на зусилля $P_{\text{рух}}$, яке діє на заготівку під час її руху:

$$P_{\text{рух}} = k_1 V_{\text{рух}}^a, \quad (11)$$

де k_1 , a — емпіричні коефіцієнти.

З роботи [2] використаємо формулу:

$$\varepsilon = B(T)\sigma^n t. \quad (12)$$

Після підстановки (11) в (12) за умови, що $T = \text{const}$, одержуємо:

$$\omega = K_V V_{\text{рух}}^a t_{\text{рух}} \quad \text{або} \quad \omega = K_V V_{\text{рух}}^a t_{\text{рух}}, \quad (13)$$

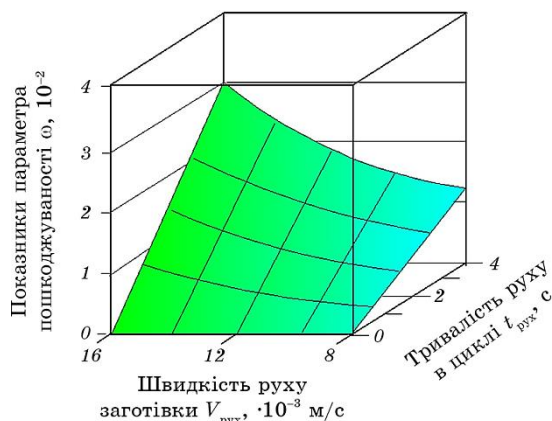


Рис. 4. Вплив швидкості та тривалості руху заготівки на параметр пошкоджуваності ω у разі поступального руху під час подолання сили тертя спокою за $f_{\text{рух}} = 5,0 \text{ хв}^{-1}$.

Fig. 4. Effects of the speed of movement and the time of movement of the billet on the damage parameter ω under translational movement while overcoming the static friction force at $f_{\text{рух}} = 5.0 \text{ min}^{-1}$.

де K_V , a , n , $\mu = an$ — емпіричні коефіцієнти, $t_{\text{рух}}$ — тривалість руху заготовки в циклі.

З роботи [8] за умов $t = 4$ с та $P_{\text{рух}} = 0,4$ МПа визначили коефіцієнти для рівняння (13): $\mu = 1,45$ та $K_V = 1,32$ для поступального руху і $K_V = 0,95$ для реверсивного руху заготовки у разі подолання СТС.

На рисунку 5 одержуємо характер зміни параметра пошкоджуваності ω в залежності від двох параметрів: швидкості $V_{\text{рух}}$ та тривалості руху $t_{\text{рух}}$ заготовки у циклі у разі поступального руху.

На рисунку 5 наведено залежності 1 та 2, які пояснюють характер зростання показника ω під час подолання опору сили тертя спокою та сили тертя ковзання (СТК). Видно, що збільшення параметра пошкоджуваності ω здійснюється за рахунок стрибка ω під час подолання СТС у разі поступального руху заготовки.

На рисунку 6 показано характер зміни ω в залежності від $V_{\text{рух}}$ та $t_{\text{рух}}$ заготовки у циклі у разі реверсивного руху заготовки під час подолання СТС.

На рисунку 7 показано характер зміни накопичення ω у разі реверсивного руху заготовки. Видно, що реверсивний рух заготовки під час подолання СТС має менше зростання ω (залежності 1, рис. 7) порівняно з технологічними параметрами, які відповідають залежності 2, рис. 5.

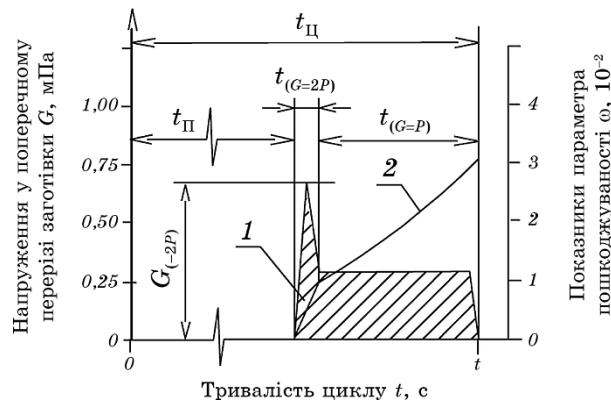


Рис. 5. Схеми зміни напруження у заготівці у разі поступального руху під час подолання сили тертя спокою та сили тертя ковзання за $f_{\text{рух}} = 5,0$ хв⁻¹: 1 — стрибок показника параметра пошкоджуваності під час подолання сили тертя спокою; 2 — швидкість зростання параметра пошкоджуваності під час подолання сили тертя ковзання.

Fig. 5. Patterns of variations in stresses in the billet under translational movement while overcoming the static friction force and sliding friction force at $f_{\text{рух}} = 5.0$ min⁻¹: 1—bounce in the value of the damage parameter while overcoming the static friction force; 2—rate of increase of the damage parameter while overcoming the sliding friction force.

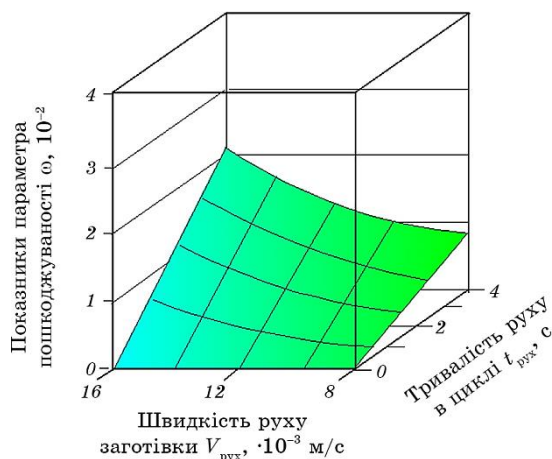


Рис. 6. Вплив швидкості та тривалості руху заготовки на параметр пошкоджуваності у разі реверсивного руху під час подолання сили тертя спокою за $f_{рух} = 5,0 \text{ хв}^{-1}$.

Fig. 6. Effects of the speed of movement and the time of movement of the billet on the damage parameter under reverse movement while overcoming the static friction force at $f_{рух} = 5.0 \text{ min}^{-1}$.

З аналізу характеру змін показників ω на рис. 4 та 6 випливає,

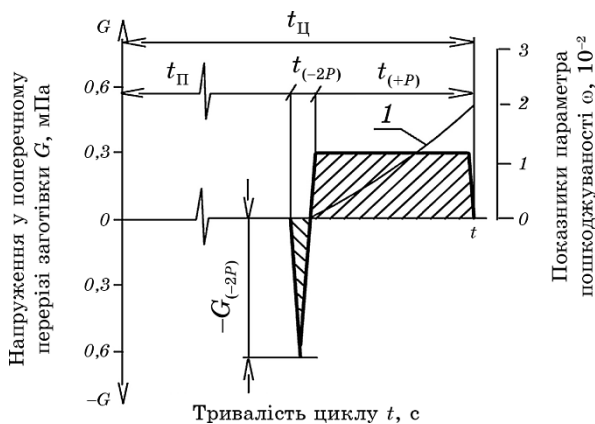


Рис. 7. Схеми зміни напруження у заготовці у циклі для її реверсивного руху під час подолання сили тертя спокою за $f_{рух} = 5,0 \text{ хв}^{-1}$: 1 — швидкість зростання параметра пошкоджуваності під час подолання сили тертя ковзання.

Fig. 7. Patterns of variations in stresses in the billet in the cycle for its reverse movement while overcoming the static friction force at $f_{рух} = 5.0 \text{ min}^{-1}$: 1—rate of increase of the damage parameter while overcoming the sliding friction force.



Рис. 8. Вплив технологічного параметра $f_{\text{рух}}$ та напрямку руху заготовки на реологічні ω і механічні $\sigma_{\text{ТС}}$ властивості заготовки [15]: 1, 2 — залежності $f_{\text{рух}}-\omega$ для поступального і реверсивного рухів заготовки під час подолання сили тертя спокою відповідно; 3, 4 — залежності $\omega-\sigma_{\text{ТС}}$ для поступального і реверсивного рухів заготовки відповідно.

Fig. 8. Effects of the process parameter $f_{\text{рух}}$ on the rheological ω and mechanical σ_{TS} properties of the billet [15]: 1, 2— $f_{\text{рух}}-\omega$ relationship for translational and reverse movement, respectively, of the billet while overcoming the static friction force; 3, 4— $\omega-\sigma_{\text{ТС}}$ relationship for translational and reverse movement of the billet.

що стрибок ω у випадку поступального руху заготовки підвищує показники ω до 0,03 (рис. 4, 5) порівняно з $\omega = 0,02$ (рис. 6, 7). Крім того показано, що коли $f_{\text{рух}} = \text{const}$ зміна $V_{\text{рух}}$ та $t_{\text{рух}}$ у циклі впливають тільки на ω і $\sigma_{\text{ТС}}$.

3.4. Обговорення одночасного впливу частоти та напрямку руху заготовки на її реологічні та механічні властивості під час подолання СТС

Зв'язок зміни показників паралельних процесів $f_{\text{рух}}$, ω , $\sigma_{\text{ТС}}$ для різному напрямку руху заготовки бронзи марки БрО5Ц5С5 наведено на рис. 9 [15].

З рисунка 8 випливає, що на механічні властивості заготовок одночасно впливають як частота руху заготовки, так і напрям її руху під час подолання СТС.

4. ВИСНОВКИ

1. Виявлено наявність декількох одночасних паралельних процесів

у заготівці з показниками ω та $\sigma_{\text{тчас}}$ у випадку зміни таких технологічних параметрів, як $f_{\text{рух}}$, $V_{\text{рух}}$ та $t_{\text{рух}}$.

2. Доказана наявність додаткового паралельного процесу з показником ξ , тому що цей показник залежить від технологічного параметра $f_{\text{рух}}$.

3. Встановлено, що швидкість зростання корки заготівки $\dot{\xi}$ і коефіцієнт твердіння $k_{\text{ТВ}}$ є одною і тією ж теплофізичною величиною, звідки випливає наступне:

– $k_{\text{ТВ}}$ не є сталою величиною, тому що він знаходиться з тривалістю твердіння $t_{\text{ТВ}}$ у гіперболічній залежності і залежить від приведеної товщини заготівки $R_{\text{пр}}$ (рис. 4);

– $k_{\text{ТВ}} = \text{const}$ може бути тільки за умов $R_{\text{пр}} = \text{const}$ для визначення $k_{\text{ТВ}}$ одного і того ж металу або стопу (рис. 4);

– для порівнювання показників для різних металів і стопів ($k_{\text{ТВ}} = \text{var}$) можна за умови $R_{\text{пр}} = \text{const}$ (рис. 4)

4. Розроблена методика для визначення коефіцієнта твердіння $k_{\text{ТВ}}$ на основі експериментальних даних, наведених у роботі [15], та визначено $k_{\text{ТВ}}$ для заготовок діаметром 0,06–0,065 м з бронзи марки Бр05Ц5С5.

5. Показано, що швидкість $V_{\text{рух}}$ і тривалість руху $t_{\text{рух}}$ заготівки за $f_{\text{рух}} = \text{const}$ впливають на параметр пошкоджуваності ω та на показники тимчасового опору розриву $\sigma_{\text{тчас}}$;

6. Визначено вплив напрямку руху заготівки на характер перебігу паралельних процесів:

– встановлено, що показники $f_{\text{рух}}$ знаходиться у прямій пропорційній залежності з показниками ξ як у разі поступального, так і у разі реверсивного напрямку руху заготівки за час подолання СТС;

– у разі поступального руху заготівки процеси з показниками ξ , ω та $f_{\text{рух}}$ знаходяться у оберненій пропорційній залежності до показників механічних властивостей $\sigma_{\text{тчас}}$ заготівки;

– у разі реверсивного руху заготівки процеси з показниками ξ , ω та $f_{\text{рух}}$ знаходяться у прямій пропорційній залежності до показників $\sigma_{\text{тчас}}$.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Ю. Н. Работнов, *Ползучесть элементов конструкций* (Москва: Наука: 1966).
2. Л. М. Качанов, *Основы механики разрушения* (Москва: Наука: 1974).
3. Л. Сосновский, С. Щербаков, *Вісник ТНТУ. Механіка та матеріалознавство*, Спец. випуск, ч. 1: 14 (2011).
4. Ю. Е. Курбатов, Г. Г. Кашеварова, *ПНИПУ Международный научно-исследовательский журнал*, № 5 (47), ч. 3: 126 (2016).
5. В. В. Куриляк, Г. І. Хімічева, О. М. Хорошилов, *Металлофиз. новейшие технол.*, 41, № 1: 71 (2019).

6. Г. Г. Писаренко, А. В. Войналович, А. Н. Майло, *Металлофиз. новейшие технол.*, **42**, № 2: 261 (2020).
7. O. Khoroshilov O. Podolyak, V. Kuryliak, A. Kipensky, and A. Lomakin, *3rd International Conference on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange (June 9–12, 2020, Kharkiv, Ukraine)*.
8. Д. В. Бреславский, Ю. М. Корытко О. А. Татарина, О. Н. Хорошилов. *Науково-технічний журнал НТУ «ХПІ»*, № 1: 234 (2008).
9. Ю. Я. Мешков, С. А. Котречко, А. В. Шиян, *Металлофиз. новейшие технол.*, **41**, № 5: 633 (2019).
10. А. А. Рыжиков, *Теоретические основы литейного производства* (Москва-Свердловск: Машгиз.: 1961).
11. А. Г. Спасский, *Основы литейного производства* (Москва: Metallurgizdat: 1950).
12. О. А. Шатагин, В. Т. Сладкошteeв, М. А. Вартазаров, С. М. Козаченко, В. Н. Терехов, *Горизонтальное непрерывное литье цветных металлов и сплавов* (Москва: Metallurgiya: 1974).
13. J. Savage, *J. Iron Steel Institute*, **200** (1962).
14. В. Я. Любoв, *Кристаллизация металлов* (Москва: Из-во АН СССР: 1960), с. 35.
15. O. Khoroshylov, V. Kuryliak, and O. Podoliak, *HST*, **10**, Iss. 2: 217 (2020).

REFERENCES

1. Yu. N. Rabotnov, *Polzuchest Elementov Konstruktsiy* [Creep of Structural Elements] (Moscow: Nauka: 1966) (in Russian).
2. L. M. Kachanov, *Osnovy Mekhaniki Razrusheniya* [Fundamentals of Fracture Mechanics] (Moscow: Nauka: 1974) (in Russian).
3. L. Sosnovskiy and S. Shcherbakov, *Kontseptsiya Povrezhdennosti Materialov* [The Concept of Material Damage], *Visnyk TNTU. Special Iss.*, Part 1: 14 (2011) (in Ukrainian).
4. Yu. Ye. Kurbatov and G. G. Kashevarova, *Mezhdunarodnyy Nauchno-Issledovatel'skiy Zhurnal* [International Research Journal], No. 5 (47), Part 3: 126 (2016) (in Russian).
5. V. V. Kurilyak, G. I. Khimicheva, and O. N. Khoroshylov, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **41**, No. 1: 71 (2019) (in Ukrainian).
6. G. G. Pisarenko, A. V. Voynalovich, and A. N. Milo, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **42**, No. 2: 261 (2020) (in Russian).
7. O. Khoroshylov, O. Podolyak, V. Kuryliak, A. Kipensky, and A. Lomakin, *3rd International Conference on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange (June 9–12, 2020, Kharkiv, Ukraine)*.
8. D. V. Breslavsky Yu. N., Korytko, O. A. Tatarinova, and O. N. Khoroshylov, *Naukovo-Tekhnichnyy Zhurnal NTU 'KHPI'*, No. 1: 234 (2008) (in Ukrainian).
9. Yu. Ya. Meshkov, S. A. Kotrechko, and A. V. Shiyan, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **41**, No. 5: 633 (2019) (in Russian).
10. А. А. Рыжиков, *Теоретические Основы Литейного Производства* [Theoretical Foundations of Foundry] (Moscow-Sverdlovsk: Mashgiz: 1961) (in Russian).
11. А. Г. Спасский, *Основы Литейного Производства* [Foundations of Foundry] (Moscow: Metallurgizdat: 1950) (in Russian).

12. O. A. Shatagin, V. T. Sladkoshteyev, M. A. Vartazarov, S. M. Kozachenko, and V. N. Terekhov, *Gorizontalkoe Nepreryvnoye Litye Tsvetnykh Metallov i Splavov* [Horizontal Continuous Casting of Non-Ferrous Metals and Alloys] (Moscow: Metallurgiya: 1974) (in Russian).
13. J. Savage, *J. Iron Steel Institute*, **200** (1962).
14. B. Ya. Lyubov, *Kristallizatsiya Metallov* [Crystallization of Metals] (Moscow: Iz-vo AN SSSR: 1960), p. 35 (in Russian).
15. O. Khoroshylov, V. Kuryliak, and O. Podoliak, *HST*, **10**, Iss. 2: 217 (2020).