

- metallurgiykh mashin vsd polomok – Protection of metallurgical machines from breakdowns*, 2014, no. 16, pp. 79-86. (Rus.)
14. Artiukh G.V., Kukhar V.V., Grushko O.V., Molodetska T.I. Adaptatsiia tekhnologii gnuttia tovtolistovoї zagotovki z vazhkodeformivnogo materialu do parametriv presovogo ustatkuvannia [Adaptation of technology of bending of thick-sheet preparation from heavy-deformable material to parameters of the press equipment]. *Zakhyst metallurgiykh mashin vsd polomok – Protection of metallurgical machines from breakdowns*, 2012, no. 14, pp. 110-115. (Ukr.)
15. Saprykin B.Yu. Analiz sposobov rascheta pruzhynenya lyastovykh materialov [Analysis of methods for calculating the springing of sheet materials]. *Izvestiya MGTU «MAMI»*, 2013, vol. 2, no. 2 (16), pp. 133-139 (Rus.)

Рецензент: С.Л. Макуров
д-р техн. наук, проф., ДВНЗ «ПДТУ»

Стаття надійшла 30.04.2021

УДК 621.785:669.15-194.2

doi: 10.31498/2225-6733.42.2021.240582

© Ткаченко І.Ф.¹, Мірошніченко В.І.²

ПРОГНОЗУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОГО СТАНУ НЕРІВНОВАЖНИХ ТЕРМОДИНАМІЧНИХ СИСТЕМ В УМОВАХ ДЕГРАДАЦІЇ ЇХНЬОЇ ВНУТРІШНЬОЇ БУДОВИ ТА ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ

Розроблено теоретичний підхід до індивідуального прогнозування характеристик енергетичного стану термодинамічних систем (ТС) у нерівноважних умовах функціонування, що супроводжуються передбачуваною та випадковою деградацією їхньої внутрішньої будови та функціональних властивостей. Отримано аналітичні співвідношення задля розрахунку базових параметрів, що забезпечують ефективне функціонування ТС з урахуванням індивідуальних особливостей їхньої внутрішньої будови. Розроблений загальний підхід застосовано задля прогнозування інтервалу температур розвитку дислокаційної повзучості дисперсно-зміцненої сталі ASTM A316 промислового виробництва. Отримані результати та їхнє фундаментальне теоретичне підґрунтя засвідчують можливість використання розробленого підходу у різних сферах застосування: техніка, управління, економіка, медицина тощо.

Ключові слова: *термодинамічні системи, нерівноважні умови функціонування, передбачувана та випадкова деградація внутрішньої будови, прогнозування характеристик енергетичного стану.*

I.F. Tkachenko, V.I. Miroshnichenko. Prediction of an energy state for nonequilibrium thermodynamic systems under service conditions of their structure and performance degradation. *A general approach is developed to individual analytic prediction of an energy state indexes for thermodynamic systems (TS) working under the nonequilibrium service conditions that cause determined and random degradation of the TS structures and performance: losses nominal levels of structure components and service properties characteristics. The following TS were proposed to be considered as relevant ones for the analysis: heat-resistant alloys; technology processes; climate, ecology and biology systems. Based on the energy conservation law, analytic relations were obtained for the TS*

¹ д-р техн. наук, проф., Донецький національний медичний університет, м. Маріуполь, ift955@gmail.com

² канд. техн. наук, ст. викладач, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, [ORCID: 0000-0002-5956-7867](http://ORCID:0000-0002-5956-7867), miroshnichenko_v_i@pstu.edu

service parameters calculations to specify conditions for the TS maximum performance reaching based on the TS individual structure features and a random factor values. The values have to be used in the relations may be rigorously experimentally or theoretically specified for each TS. The approach developed in the work was applied to predict creep temperature interval for industrial, austenite, particle hardened ASTM A316 steel. The basic possible strengthening mechanisms in the steel were taking into account: dislocation gliding with the particles and forest dislocations overcoming together with typical for the steel type structural inhomogeneities existence: the particle free zones. Proceeding from the steel real structure features, the particle overcoming by mobile dislocations was concluded to be the dominant strengthening mechanism in the steel. Hence the steel starting creep temperature was calculated which value is in accordance with the known for the Fe based alloys minimal temperature of the dislocation climbing beginning. Based on the obtained results and their fundamental theoretical background, possibility is emphasized to apply the approach in science, technology control, medicine etc.

Keywords: *thermodynamic systems, nonequilibrium service conditions, determined and random degradation of the TS structures and performance, individual analytic prediction of an energy state indexes.*

Постановка проблеми. Нерівноважні системи охоплюють широкий клас термодинамічних систем (ТС), які містять велику кількість атомів чи молекул, що перебувають у межах певного об'єму під дією великих градієнтів внутрішніх та зовнішніх факторів: температури, механічних напружень, концентрацій складових хімічних елементів та ін. Вказані умови виникають, зокрема, у твердих тілах під час їх термічної обробки, дії експлуатаційних навантажень, а також в процесі життєдіяльності біологічних систем, в кліматології, екології тощо. Типовими прикладами промислових матеріалів, які відповідають наведеному визначенню, є високолеговані конструкційні корозійностійкі сталі та суперсплави, які працюють в умовах повзучості [1]. Головною вимогою до таких сплавів є збереження високої працездатності (сукупності експлуатаційних властивостей) в умовах впливу високих температур. Однією з найважливіших невирішених проблем стосовно цих сплавів є збереження їхніх номінальних (запланованих) міцносних властивостей за умов постійного впливу високих температур при експлуатації, наслідками чого є зміни характеристик мікроструктури (коалесценція та коагуляція частинок зміцнюючих фаз тощо) [1] та відповідна термічна деградація експлуатаційних властивостей. У загальному випадку зміни внутрішньої будови та властивостей ТС, обумовлені дією температури, вочевидь, слід розглядати як системні (керовані, передбачувані), інтенсивність яких залежить від особливостей внутрішньої будови ТС (номінального хімічного складу інженерних матеріалів, в цілому, та частинок зміцнюючих фаз, зокрема; швидкості розвитку дифузійних процесів; загального фізичного стану живого організму тощо).

У той же час добре відомо, зокрема, що значний вплив на стабільність структури та властивостей згаданих промислових сплавів має виникнення хімічних та структурних неоднорідностей (відповідних внутрішніх градієнтів) в умовах виробництва та ін. [2]. Подібні випадкові (непередбачувані) зміни внутрішньої будови та властивостей ТС, вочевидь, слід вважати некерованими. Вказані та інші чинники призводять до поступових втрат експлуатаційної ефективності (деградації внутрішньої будови та властивостей) відповідальних деталей з цих матеріалів під час їхньої експлуатації. Іншим прикладом важливості збереження стабільно високих показників функціонування ТС у нерівноважних умовах є стабілізація показників життєдіяльності багатоклітинних організмів, порушення якої обумовлено виникненням патологій різної етіології. Одним з різновидів згаданих патологій є інфекційні вірусні захворювання, боротьба з якими набуває все більшої актуальності в наш час.

У розглянутих вище умовах прогнозування індивідуального перебігу процесів дестабілізації внутрішньої будови та функціональних властивостей нерівноважних ТС на теперішній час не може бути здійснено безпосередньо на науково обґрунтованому об'єктивному кількісному рівні.

Мета роботи – розробити науково обґрунтований підхід до кількісного індивідуального прогнозування енергетичного стану ТС у нерівноважних умовах функціонування, що супроводжуються передбачуваною та випадковою деградацією внутрішньої будови та функціональних

властивостей ТС.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Стабілізація внутрішньої будови та прогнозування властивостей ТС з метою забезпечення високо ефективного їхнього функціонування у запланованих нерівноважних умовах протягом потрібного терміну є актуальною науково-технічною проблемою, що потребує науково обґрунтованого вирішення у різних галузях народного господарства: матеріалознавстві [1-3], управлінні технологічними процесами [4] та розвитком економіки [5], кліматології [6], медицині [7] та ін. Проте, на теперішній час вказану проблему вирішують у більшості випадків або на якісному суб'єктивному рівні [7], або з використанням недостатньо надійних експериментальних даних [2, 3] та шляхом застосування статистичних методів прогнозування загального перебігу певних перехідних процесів із подальшим розрахунком ймовірності різних кінцевих варіантів їхнього завершення [7].

Виклад основного матеріалу. Згідно одного з базових законів природи – закону збереження енергії (першого закону термодинаміки), для будь-якої (*i*-тої) ТС, яка має загальний запас енергії E_i , залежність роботи W_i , яку може виконати *i*-та ТС від температури T , має аналітичний вигляд:

$$W_i = E_i - TS_i, \tag{1}$$

де $S_i \approx \text{const}$ – є ентропія *i*-тої ТС; $T = Q/S_i$, де Q – кількість теплоти.

Такі залежності $W_i(T)$, що схематично зображені на рис. 1, вочевидь, є наслідком природних (керованих, передбачуваних) змін (термічної деградації) внутрішньої будови (втрати впорядкованої взаємоузгодженої поведінки атомів чи молекул) ТС із зростанням її температури. Ступінь вказаної термічної деградації (інтенсивності передбачуваних змін внутрішньої будови), як відомо, характеризує значення S_i , а саме: $S_i \rightarrow \infty$ відповідає високому потенціалу ТС щодо виконання роботи та інтенсивній термічній деградації *i*-тої ТС з підвищенням температури функціонування; $S_i \rightarrow 0$ відповідає вкрай низькій здатності (потенціалу) ТС виконувати роботу та низькій інтенсивності передбачуваного деградаційного впливу температури. За умов, що робочі температури ТС знаходяться у межах одного інтервалу $T_{\min} \dots T_{\max}$, для ентропії *i*-тої ТС можна записати:

$$S_i = (E_i - W_i^{\max})/T_{\min}, \tag{2}$$

де W_i^{\max} – максимальне значення W_i у робочому інтервалі температур за умов виключно керованих змін внутрішньої будови ТС. Слід підкреслити, що значення W_i^{\max} залежать від індивідуальних особливостей внутрішньої будови ТС, проте для ТС одного різновиду можуть змінюватись у межах: $0.. W_0^{\max}$, де W_0^{\max} – максимально можливе значення W_i^{\max} для ТС одного різновиду. Тобто характеристики W_0^{\max} та W_i^{\max} можна розглядати як, відповідно, потенційну максимальну роботу ТС та індивідуальну максимальну роботу ТС.

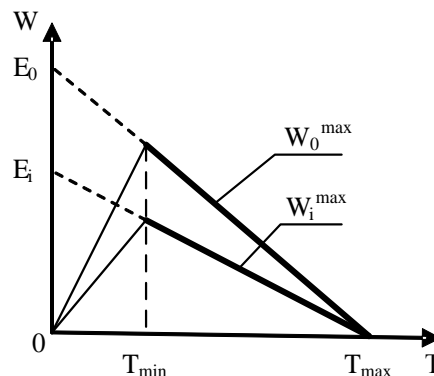


Рис. 1 – Схема температурних залежностей (передбачуваної термічної деградації внутрішньої будови) роботи ТС одного різновиду за різних особливостей їхньої внутрішньої будови (значень W_i^{\max} або S_i) в межах інтервалу температур функціонування $T_{\min} \dots T_{\max}$

Шляхом визначення обмежувальних значень W_i за температур T_{\min} та T_{\max} : W_i^{\max} та 0, відповідно, можна знайти $E_i = (W_i^{\max} / (T_{\max} - T_{\min})) \cdot T_{\max}$ індивідуально для кожної ТС. Треба підкреслити, що всі характеристики праворуч в цьому рівнянні може бути визначено експериментально для кожної конкретної (i -тої) ТС.

Як було зазначено вище, важливою особливістю функціонування будь-якої реальної ТС є можливість зменшень базової характеристики її стану E_i внаслідок одночасних дій керованих та випадкових змін внутрішньої будови ТС. Для певних різновидів ТС (жароміцні сплави; біологічні, екологічні, кліматичні та ін. системи) обов'язковим явищем є природна (передбачувана) деградація внутрішньої будови ТС в процесі її функціонування, яка обумовлена системними змінами характеристик компонентів внутрішньої будови ТС (коагуляція, коалесценція частинок зміцнюючих фаз твердих тіл, зменшення працездатності живих організмів з перевищенням власної оптимальної температури тощо). Окрім того, під час виробництва та функціонування вказаних вище ТС поширеним явищем є випадкові (непередбачувані) зміни їхньої внутрішньої будови: утворення хімічних та структурних неоднорідностей, відхилень фактичного хімічного складу компонентів структури твердих тіл від номінального; виникнення патологій у біологічних системах, катастрофічних явищ у кліматології та екології. Ці випадкові явища, додатково до передбачуваних, викликають погіршення здатності ТС виконувати потрібну роботу під час свого функціонування. Вочевидь випадкові (непередбачувані) зміни енергетичного становища i -тої ТС мають позначатись також на рівнях W_i за обмежувальних значень експлуатаційних температур.

В якості кількісної характеристики рівня вказаних випадкових зменшень здатності i -тої ТС до виконання роботи або незворотних втрат внутрішньої енергії E_i , обумовлених некерованими (непередбачуваними) змінами внутрішньої будови, будемо використовувати показник q . Значення q може бути визначено, у загальному випадку, декількома шляхами:

- усереднення окремих значень q , що отримано у декількох випадках експериментальних спостережень за аналогічними за своєю природою явищами випадкових змін внутрішньої будови реальних ТС;

- під час спеціально виконаних лабораторних досліджень відповідних явищ, які спостерігаються у реальних ТС;

- шляхом вибору домінуючого процесу серед тих, що мають послідовний розвиток та є наслідком альтернативних змін внутрішньої будови ТС.

Будемо також вважати, задля спрощення: $q(T) = \text{const}$. Тоді, враховуючи, що $S_i = \text{const}$, можемо записати: $E_i(q) = E_i - q$ та $W_i^{\max}(q) = W_i^{\max} - q$ (див. рис. 2) у межах всього інтервалу робочих температур $T_{\min} \dots T_{\max}$ за умов одночасного розвитку керованих та некерованих процесів деградації. Беручи до уваги, що T_{\max} , за визначенням, відповідає повній втраті здатності будь-якої ТС до виконання роботи (повна деградація внутрішньої будови та функціональних властивостей): $W_i(T_{\max}) = 0$ та, використовуючи підхід, застосований вище, задля визначення E_i , можна знайти формулу для розрахунків температури $T_i^{\max}(q)$, за досягнення якої, аналогічно до T_{\max} , буде отримано $W_i(q) = 0$ для ТС, що має випадкові зміни внутрішньої будови, які призводять до втрат внутрішньої енергії на рівні q :

$$T_i^{\max}(q) = T_{\max} \cdot (1 - q/E_i), \quad (3)$$

або

$$T_i^{\max}(q) = T_{\min} \cdot (E_i - q) / (E_i - W_i^{\max}).$$

З використанням цих формул можна визначити умови повної втрати здатності i -тої ТС до впорядкованого функціонування внаслідок повної термічної деградації її внутрішньої будови за наявності непередбачуваних (випадкових) змін такої будови, а саме: переходу у становище, коли i -та ТС буде мати повністю деградовану внутрішню будову за мінімальної температури функціонування даного різновиду ТС, тобто, $T_i^{\max}(q) \rightarrow T_{\min}$. Для таких умов треба записати: $q \rightarrow W_i^{\max}$ або $q \rightarrow E_i \cdot (1 - T_{\min}/T_{\max})$.

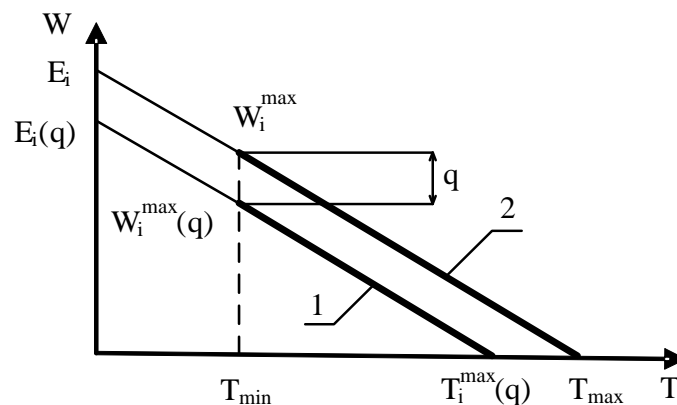


Рис. 2 – Схема температурних залежностей роботи (передбачуваної термічної деградації здатності до здійснення роботи) i -тої ТС певної внутрішньої будови за відсутності (залежність 1) та за наявності (залежність 2) випадкових (непередбачуваних) змін внутрішньої будови: q – втрати внутрішньої енергії ТС внаслідок випадкових змін її внутрішньої будови

Окрім того, можна також знайти співвідношення q та W_i^{\max} , за яких зниження максимально припустимої температури функціонування i -тої ТС (коли $W_i^{\max}(q) = 0$) не перевищуватиме прийняттого для такої ТС наперед наданого значення $\Delta T_i = T_{\max} - T_i^{\max}(q)$:

$$q/W_i^{\max} < 1 - (T_{\max}/\Delta T_{\max}) \cdot (\Delta T_{\max} - \Delta T_i)/(\Delta T_{\max} - \Delta T_i), \quad (4)$$

де $\Delta T_{\max} = T_{\max} - T_{\min}$.

Саме за такого ступеню випадкових змін внутрішньої будови i -тої ТС, який характеризується значенням q , ТС буде зберігати свою працездатність в необхідному інтервалі температур функціонування, тобто від T_{\min} до $(T_{\max} - \Delta T)$.

Важливе значення задля прогнозування працездатності будь-якої ТС в умовах одночасного розвитку процесів керованих та випадкових змін її внутрішньої будови та функціональних властивостей має визначення стану внутрішньої будови ТС або рівня W_i^{\max} , який має бути досягнуто за відсутності випадкових змін внутрішньої будови ТС (запас внутрішньої енергії за найбільш сприятливих умов її функціонування: $T = T_{\min}$) з метою мінімізації потенційно можливого впливу випадкових змін. Саме співвідношення значень $W_i^{\max}(q)$ (запасу внутрішньої енергії) для кожної ТС та очікуваного заздалегідь ступеню можливих випадкових змін цієї енергії q , обумовлених відповідними змінами внутрішньої будови, може забезпечити мінімально можливе зниження максимальної температури повної втрати працездатності відповідної ТС в умовах одночасного розвитку процесів передбачуваних та випадкових змін внутрішньої будови ТС. Відповідна формула має вигляд (див. рис. 1):

$$W_i^{\max}(q) \geq (E_0 - q)(W_0^{\max}/E_0), \quad (5)$$

де E_0 – максимально можливе значення E_i серед ТС одного різновиду; W_0^{\max} – потенційна максимальна робота ТС (максимально можливе значення W_i^{\max} ТС одного різновиду за відсутності випадкових змін її внутрішньої будови).

З формули (5) випливає, зокрема, що за очікуваного заздалегідь рівня можливих випадкових втрат внутрішньої енергії q , обумовлених випадковими процесами деградації внутрішньої будови певного різновиду ТС, інтервал температур функціонування, максимально наближений до номінальних температур виконання роботи i -тої ТС (від T_{\min} до T_{\max}), може бути досягнуто, якщо забезпечити для такої ТС, в умовах $T = T_{\min}$ та відомого очікуваного q , здатність виконувати роботу не меншу за $[W_i^{\max}(q)]_{\min} = (E_0 - q)(W_0^{\max}/E_0)$. Слід підкреслити, що задля вичерпної характеристики працездатності ТС за очікуваного рівня q слід також брати до уваги значен-

ня $T_i^{\max}(q)$, оскільки якщо $q \rightarrow E_0$, будемо мати: $T_i^{\max}(q) \rightarrow T_{\min}$. Враховуючи наведену вище залежність $E_i = E_i \cdot (W_i^{\max})$, останню формулу можна записати у вигляді:

$$[W_i^{\max}]_{\min} = (W_i^{\max} \cdot (T_{\max}/T_{\min}) / (T_{\max}/T_{\min} - 1) - q) \cdot (T_{\max}/T_{\min} - 1) \cdot T_{\min}/T_{\max}. \quad (6)$$

В якості прикладу застосування розробленого підходу до прогнозування характеристик індивідуального перебігу процесів деградації внутрішньої будови та властивостей ТС у нерівноважних умовах під впливом передбачуваних та випадкових факторів, розглянемо особливості процесу експлуатації сталі ASTM A316 промислового виробництва. Ця сталь є аустенітною, високоміцною, корозійностійкою, дисперсно-зміцненою сталлю, яка призначена для виготовлення деталей ядерних реакторів на швидких нейтронах [2], що експлуатуються за температур до ~ 873 К ($\sim 600^\circ\text{C}$). Згідно результатів [2], механізмом пластичної деформації такої сталі в інтервалі температур $573 \dots 873$ К є дислокаційна повзучість, яка полягає у почерговому розвитку процесів ковзання та переповзання дислокацій. Процес ковзання, як відомо, відбувається шляхом огинання мобільними дислокаціями частинок зміцнюючих фаз з подоланням енергетичного бар'єру $2Gb^3$ за температури 0 К. Враховуючи високу ймовірність утворення структурних неоднорідностей у високолегованих промислових сталях (зон вільних від частинок зміцнюючих фаз тощо) та тривале збереження сформованих неоднорідностей у відповідній промисловій продукції (внаслідок уповільненої дифузії хімічних елементів заміщення), природним є існування у структурі вказаної сталі певної частки зерен, в інтер'єрі яких відсутні частинки зміцнюючих фаз внаслідок їхньої локалізації вздовж меж зерен. За таких умов, згідно [2], процес переміщення мобільних дислокацій в інтер'єрі зерен контролює їхній перетин з дислокаціями «лісу», що потребує подолання енергетичного бар'єру заввишки $0.5Gb^3$ за температури 0 К. Звідси можна визначити середній спротив ковзанню дислокацій крізь вкрай велику кількість зерен двох вказаних різновидів, як: $(2Gb^3 + 0.5Gb^3)/2 = 1.25Gb^3$. Окрім того, в умовах підвищених температур, які забезпечують послідовний розвиток процесів ковзання та переповзання дислокацій, етапом, який контролює процес переміщення дислокації в цілому (домінуючим етапом), буде той, який матиме найвищий енергетичний бар'єр, подолання якого є необхідним задля переміщення окремої дислокації на велику відстань у кристалі. Таким процесом серед двох вище згаданих є процес ковзання дислокацій, який може бути розглянуто як діючий окремо. Цей висновок узгоджується з експериментальними даними [2] щодо повзучості високоміцних сталей та сплавів, які відповідають процесу термічно-активованого ковзання дислокацій, на відміну від повзучості, що контролюється переповзанням.

Виходячи з викладеного та формули (1) будемо мати:

$$T_i^{\max}(q) \approx 873 \cdot 1.25Gb^3/2 \cdot Gb^3 \approx 550 \text{ K } (\sim 280^\circ\text{C}),$$

що відповідає відомій [2] мінімальній температурі ($\sim 300^\circ\text{C}$) початку розвитку повзучості в сталях, яка являє собою пластичну деформацію твердого матеріалу за низьких експлуатаційних навантажень, обумовлену підвищеною температурою матеріалу. Внаслідок вказаних незворотних змін форми та розмірів частинок зміцнюючих фаз, за постійних зовнішніх навантажень, матеріал поступово втрачає свою здатність здійснювати певні заплановані функції під час своєї експлуатації, що можна визначити як деградацію його експлуатаційних властивостей.

Таким чином, виконаний аналіз засвідчує, що запропонований теоретичний підхід дозволяє, зокрема, стосовно металевих сплавів прогнозувати діапазон температур їхньої можливої експлуатації в умовах деградаційних впливів передбачуваного та випадкового характеру, відповідно, температури та структурних неоднорідностей. Отримані результати та фундаментальне теоретичне підґрунтя дають підстави задля широкого використання розробленого теоретичного підходу у різних сферах застосування: наука, техніка, економіка, медицина та ін.

Висновки

1. Виходячи з фундаментальних фізичних законів (закону збереження енергії, другого закону термодинаміки) розроблено теоретичний підхід задля індивідуального прогнозування характеристик енергетичного стану ТС у нерівноважних умовах експлуатації, що супроводжуються передбачуваною та випадковою деградацією їх внутрішньої будови та функціональних властивостей.

2. Отримано аналітичні співвідношення, що дозволяють розраховувати значення базових параметрів: інтервалу температур, ступенів випадкової деградації внутрішньої будови та властивостей, запасу внутрішньої енергії та ін., що забезпечують ефективне функціонування ТС з урахуванням індивідуальних особливостей їхньої внутрішньої будови та умов функціонування.
3. Розроблений підхід застосовано задля прогнозування інтервалу температур розвитку процесу дислокаційної повзучості аустенітної, корозійностійкої, дисперсно-зміцненої сталі ASTM A316 промислового виробництва для виготовлення деталей ядерних реакторів на швидких нейтронах.
4. Показано високу точність прогнозування припустимих значень характеристик металевих матеріалів, що експлуатуються в умовах деградаційних впливів передбачуваного та випадкового характеру, відповідно, температури та структурних неоднорідностей.
5. Отримані результати та фундаментальне теоретичне підґрунтя засвідчують можливість використання розробленого теоретичного підходу у різних сферах застосування: наука, техніка, економіка, медицина та ін.

Перелік використаних джерел:

1. Reed R.C. The Superalloys: Fundamentals and Applications / R.C. Reed. – Cambridge University Press, 2006. – 372 p.
2. Frost H. Deformation mechanism maps for pure iron and alloy steels, in «Fundamental Aspects of Structural Alloy Design» / H. Frost, M. Ashby; Ed.: R. Jaffee and B. Wilcox. – NY: Plenum Press, 1977. – 459 p.
3. Martin J. Stability of microstructure in metallic systems / J. Martin, R. Doherty – Cambridge University Press, Cambridge, 1997. – 426 p.
4. Energy Efficient Design of Auxiliary Systems in Fossil-Fuel Power Plants. ABB Energy Efficiency Handbook. – 2009. – 362 p. – Mode of access: https://web.archive.org/web/20140805131600/http://www.seeei.org.il/prdFiles/2702_desc3.pdf.
5. Adams W.M. Transition to Sustainability: Towards a Humane and Diverse World / W.M. Adams, S.J. Jeanrenaud. – Gland, Switzerland: IUCN, 2008. – 111 p. – Mode of access: [https://www.iucn.org/sites/dev/files/import/downloads/transition to sustainability sep 08 en 2.pdf](https://www.iucn.org/sites/dev/files/import/downloads/transition%20to%20sustainability%20sep%2008%20en%202.pdf).
6. Collins J.M. Climatology / J.M. Collins // Oxford Bibliographies in Geography. – 2018. – Mode of access: <https://doi.org/10.1093/obo/9780199874002-0096>.
7. The value of vital sign trends in predicting and monitoring clinical deterioration: A systematic review / I.J. Brekke, L.H. Puntervoll, P.B. Pedersen, J. Kellett, M. Brabrand // PloS one. – 2019. – Vol. 14 (1). – Pp. 1-13. – Mode of access: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0210875>.

References:

1. Reed R.C. The Superalloys: Fundamentals and Applications. Cambridge University Press Publ., 2006. 372 p.
2. Frost H., Ashby M. Deformation mechanism maps for pure iron and alloy steels, in «Fundamental Aspects of Structural Alloy Design». New York, Plenum Press Publ., 1977. 459 p.
3. Martin J., Doherty R. Stability of microstructure in metallic systems. Cambridge, Cambridge University Press Publ., 1997. 426 p.
4. Energy Efficient Design of Auxiliary Systems in Fossil-Fuel Power Plants. ABB Energy Efficiency Handbook. 362 p. Available at: https://web.archive.org/web/20140805131600/http://www.seeei.org.il/prdFiles/2702_desc3.pdf. (accessed 13 February 2021).
5. Adams W.M., Jeanrenaud S.J. Transition to Sustainability: Towards a Humane and Diverse World. Gland, Switzerland, IUCN Publ., 2008. 111 p. Available at: [https://www.iucn.org/sites/dev/files/import/downloads/transition to sustainability sep 08 en 2.pdf](https://www.iucn.org/sites/dev/files/import/downloads/transition%20to%20sustainability%20sep%2008%20en%202.pdf). (accessed 20 February 2021).
6. Collins J.M. Climatology. *Oxford Bibliographies in Geography*, 2018. doi: 10.1093/obo/9780199874002-0096. Available at: <https://www.oxfordbibliographies.com/view/document/obo-9780199874002/obo-9780199874002-0096.xml>. (accessed 01 February 2021).

7. Brekke I.J., Puntervoll L.H., Pedersen P.B., Kellett J., Brabrand M. The value of vital sign trends in predicting and monitoring clinical deterioration: A systematic review. *PloS one*, 2019, vol. 14 (1), pp. 1-13. doi: 10.1371/journal.pone.0210875. Available at: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6333367/>. (accessed 01 March 2021).

Рецензент: В.О. Маслов
д-р техн. наук, професор, ДВНЗ «ПДТУ»

Стаття надійшла 23.03.2021

УДК 66.046:532.137

doi: 10.31498/2225-6733.42.2021.240586

© Макуров С.Л.¹, Погібасєв О.Є.²

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОПРОВІДНОСТІ ШЛАКІВ, ЩО ЗАСТОСОВУЮТЬСЯ У ПРОЦЕСАХ СПЕЦІАЛЬНОЇ ЕЛЕКТРОМЕТАЛУРГІЇ (СЕМ)

Розвиток металургійної промисловості України в значній мірі залежить від експорту спеціальних сталей високої якості, які одержують способами спеціальної електрометалургії. Якість металу, що одержують такими способами (в першу чергу способом ЕШП), визначається властивостями флюсу на основі CaF_2 , з якого протягом плавки утворюється рідкий шлак. Шлак служить джерелом теплоти, а також середовищем, в якому включення, що містяться в металі, та шкідливі домішки видаляються в результаті хімічної реакції або розчинення. Впливаючи на шлак, можна здійснювати вплив не лише на хімічний склад, а також на структуру злитка. В цілому вказані шлаки повинні мати не лише високу рафінуючу здатність, а й відповідати ряду інших вимог, які на практиці частенько вступають у протиріччя. У кожному конкретному випадку треба підібрати такий шлак, який відповідатиме найбільш важливим вимогам, у першу чергу має оптимальну електропровідність. З метою застосування шлаків раціонального хімічного складу виконали експериментальні дослідження електропровідності деяких шлаків, що застосовують у процесах спеціальної електрометалургії. У роботі використовували експериментальну установку із застосуванням датчика оригінальної конструкції. Вимірювальна гарунка, що занурюється у тигель з рідким шлаком, зроблена з нітрідборового циліндра, у який вставлена терморпара та вольфрамові електроди для вимірювання електропровідності. Вимірювання проводили з використанням змінного струму із частотою 400 Гц. Одержані експериментальні результати добре відповідають літературним даним щодо флюсів із хімічним складом близьким к дослідженню і даним розрахунків за рекомендованою в літературі емпіричною формулою. Результати виконаних досліджень дозволяють рекомендувати для промислового використання флюси АН-14 та АН-15, які, крім усього, вміщують невелику кількість шкідливого для здоров'я плавикового шпату.

Ключові слова: флюс, шлак, плавлення, температура, хімічний склад, електропровідність, тигель, вимірювання.

S.L. Makurov, O.E. Pogibayev. Experimental study of electrical conductivity of slags used in special electrometallurgy (SEM). The development of the metallurgical industry

¹ д-р техн. наук, професор, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, makurov@urk.net

² студент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, legdars.official@gmail.com