

PACS numbers: 46.70.De, 62.20.-x, 62.40.+i, 81.05.Bx, 81.40.Gh

## Температурні залежності механічних властивостей жароміцних титанових стопів системи Ti–Si–X за циклічного навантаження

С. О. Фірстов, Ю. Ф. Луговський, М. М. Кузьменко, Л. Д. Кулак,  
В. А. Назаренко, С. А. Спірідонов, А. О. Донська\*

*Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України,  
вул. Омеляна Прицака, 3,  
03142 Київ, Україна*  
*\*Державне підприємство «Івченко-Прогрес»,  
вул. Іванова, 2,  
69068 Запоріжжя, Україна*

Досліджено вплив температури та вмісту основних  $\alpha$ -стабілізаторів структури на модуль пружності та циклічну міцність жароміцних титанових стопів. Стопи було одержано в електронно-променевої ливарній установці на базі вакуумної індукційної печі та було продеформовано за температур  $\alpha$ - $\beta$ -перетворень. Загальний ступінь деформації матеріалу становив 94–96%. Для зіставлення одержаних результатів із відомими даними дослідили відомі жароміцний титановий стоп BT25U та високоміцний стоп BT6. Модуль пружності досліджених матеріалів визначали за резонансних поздовжніх і вигинальних коливань у діапазоні температур від 20 до 820°C, а криві багатоциклової втоми за вигину будували за температур у 20 та 650°C на частоті навантаження біля 2 кГц. Виходили з того, що фізичні сенси взаємопов'язаних характеристик циклічної міцності та пружності — різні і тому потребують окремого розгляду в залежності від температури та від складу основних леґувальних хемічних елементів. Порі-

Corresponding author: Yuriy Fedorovych Luhovs'kyu  
E-mail: lugovskoi\_u@ukr.net

*I. M. Frantsevych Institute for Problems in Materials Science, N.A.S. of Ukraine,  
3 Omeljan Pritsak Str., UA-03142 Kyiv, Ukraine*  
*\*Government Enterprise 'Ivchenko-Progress',  
2 Ivanova Str., UA-69068 Zaporizhzhia, Ukraine*

Citation: S. O. Firstov, Yu. F. Luhovs'kyu, M. M. Kuz'menko, L. D. Kulak,  
V. A. Nazarenko, S. A. Spiridonov, and A. O. Dons'ka, Temperature Dependences of Mechanical Properties of Heat-Resistant Titanium Alloys of the Ti–Si–X System under with Cyclic Load, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 45, No. 3: 311–327 (2023) (in Ukrainian).  
DOI: [10.15407/mfint.45.03.0311](https://doi.org/10.15407/mfint.45.03.0311)

вняли температурні залежності пружності, а також залежності модуля пружності від вагового вмісту Алюмінію та від алюмінійового еквіваленту з аналогічними залежностями для межі витривалості. Показано кореляцію між показниками та нахилами відомих температурних залежностей модуля пружності та межі витривалості. На підставі цього проведено орієнтовні опуклі залежності границі витривалості від температури. Це дало змогу порівняти відомі й одержані результати для втоми жароміцних титанових стопів. Показано, що за температури у 600°C дані для експериментального стопу 2Т85-3 з великим вмістом Силіцію за значеннями багатоциклової втоми збігаються з такими для відомого стопу ВТ41. Встановлено, що залежності межі витривалості від алюмінійового еквіваленту для 20°C точніші за ці залежності для алюмінію.

**Ключові слова:** температура, модуль пружності, втома, жароміцні титанові стопи, алюміній.

The effect of temperature and content of the main  $\alpha$ -stabilizers of the structure on the elasticity module and the cyclic strength of heat-resistant titanium alloys are investigated. The alloys are obtained in the electron-beam foundry based on the vacuum induction furnace and are cleaned at  $\alpha$ - $\beta$  transformations. The total degree of deformation of the material is of 94–96%. To compare the results with known data, known heat-resistant titanium alloy ВТ25У and a high-strength alloy of ВТ6 are investigated. The module of elasticity is determined at longitudinal and bending resonant vibrations in the temperature range from 20 to 820°C, and the curves of multicycle fatigue at bending are plotted at temperatures of 20 and 650°C at a load frequency of about 2 kHz. It is assumed that the physical meanings of the interrelated characteristics of cyclic strength and elasticity are different and, therefore, require separate considerations depending on the temperature and the composition of the main alloying chemical elements. We compare the temperature dependences of elasticity and the dependences of the modulus of elasticity on the weight content of aluminium and on the aluminium equivalent with similar dependences for the endurance limit. The correlation between the indicators and the slopes of the known temperature dependences of the modulus of elasticity and the endurance limit is revealed. Based on this, approximate convex dependences of the endurance limit on temperature are carried out. This makes it possible to compare known and obtained results for fatigue of heat-resistant titanium alloys. As shown, at a temperature of 600°C, the data for the experimental alloy 2Т85-3 with a high content of silicon coincide with the values of multicycle fatigue for the known alloy ВТ41. As established, the dependence of the endurance limit on the aluminium equivalent at 20°C is more accurate in comparison with these dependences on aluminium.

**Key words:** temperature, module of elasticity, fatigue, heat-resistant titanium alloys, aluminium.

*(Отримано 23 липня 2022 р.; остаточн. варіант — 14 вересня 2022 р.)*

## 1. ВСТУП

В останнє десятиріччя проводяться інтенсивні роботи по розробці нового класу жароміцних титанових стопів здатних працювати до температур 650–700°C. В таких стопах ефект зростання фізико-механічних характеристик при високих температурах досягається за рахунок оптимального легування Алюмінієм і підвищеного, у порівнянні із промисловими жароміцними титановими стопами, вмісту Силіцію [1–5]. При введенні в титанові стопи Силіцію, що перевищує його межу розчинності, в процесі кристалізації стопу відбувається виділення первинних силіцидів фази  $Ti_3Si$ . Зміцнення матеріялу при цьому стає комбінованим за рахунок внесків твердо розчинного і дисперсного зміцнювальних механізмів [3]. У роботах [3, 4] показано, що за рахунок проведення різних видів пластичної деформації титанових стопів з підвищеним вмістом Силіцію можливе істотне підвищення їхніх механічних властивостей і пластичності при кімнатній температурі. Це досягається в першу чергу за рахунок подрібнення колоній евтектичних силіцидів [6, 7]. Додаткове дисперсійне зміцнення твердого розчину при цьому відбувається як за рахунок виділення у твердому розчині вторинних виділень частинок силіцидів, так і за рахунок рівномірно розподілених та подрібнених до розміру 1–5 мкм частинок евтектичної силіцидної фази  $Ti_5Si_3$ .

Втомні властивості жароміцних титанових стопів представлені в роботах [8–11]. Показано, що межа витривалості при кімнатній температурі жароміцних титанових стопів з високим вмістом кремнію досліджених в [7–9] досягає 600–810 МПа. Опір втоми при високих температурах таких матеріялів досліджувався в [10] на зразках з надрізом. Результати втомних досліджень на гладких зразках відомих жароміцних титанових стопів при температурах 500–600°C описані в [8] та [11]. Необхідно також відмітити, що для втоми при температурі 600°C, межі витривалості різних модифікацій сучасного жароміцного титанового стопу ВТ41 складають 370 і 410 МПа [8].

Мета даної роботи — визначення температурних залежностей механічних властивостей жароміцних титанових стопів системи  $Ti-Si-X$  з різним хемічним складом і термомеханічним обробленням при циклічному навантаженні в діапазоні температур 20–650°C.

## 2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДЕТАЛІ

У даній роботі зразки матеріялів для дослідження одержували топленням вихідних компонентів в електронно-променевої ливарній установці на базі вакуумної індукційної печі ІСВ-004 та їх дефор-

**ТАБЛИЦЯ 1.** Перелік титанових стопів для досліджень, вміст Алюмінію та їх алюмінієвий еквівалент.

**TABLE 1.** List of titanium alloys for investigation, aluminium content and their aluminium equivalent.

№	Стоп	Хемічний склад, % ваг.	
		Al	Al еквівалент
1	BT9 [11]	5,8–6,9	9,78
2	BT25У	6,0–7,0	10,77
3	2Т85-3	6,5–7,5	11,0
4	ЖТ18-3	6,8–8,0	11,8
5	ЖТ19-1	6,6–7,6	11,53
6	ЖТ19-3,4	6,0–7,2	11,12

муванням при температурах  $\alpha$ - $\beta$ -перетворень. Загальна ступінь деформації матеріялу становила 94–96% [7]. Для зіставлення отриманих результатів з відомими даними стопу дослідили відомий жароміцний титановий стоп BT25У та використали інформацію про відомий стоп BT9 [11]. Перелік досліджених стопів наведено в табл. 1. В ній же надано вміст Алюмінію в стопах та значення алюмінієвого еквіваленту, розрахованого за формулою:

$$Al_{\text{екв}} = \%Al + \%Sn / 3 + \%Si / 3 + \%Zr / 6 + 10(\%O + \%C + \%N).$$

Структуру досліджених матеріялів вивчали на шліфах, з яких робили фото на оптичному мікроскопі OLYMPUS IX70 при збільшенні  $\times 100$ – $1000$ .

Зразки для дослідження на модуль пружності та втому вирізали у вигляді прямокутних стрижнів розмірами  $50 \times 4 \times 1$  мм, їх гострі грані затуплювали, а поверхні полірували до дзеркального стану.

Модуль Юнга досліджених матеріялів при поздовжніх (п) коливаннях і кімнатній (к) температурі  $E_{\text{п}}$  визначали за методикою [12] на частоті близько 45 кГц, а при коливаннях згину і високих температурах до  $820^{\circ}\text{C}$  визначали  $E_{\text{и}}$  за методикою [13]. При цьому зразок закріплювали консольно і збуджували резонансні коливання згину на першій формі коливань зразка на частоті  $f_{\text{ик}} = 400$ – $500$  Гц. Будували залежність  $f_{\text{и}}$  від температури  $T$ , а також залежність  $E_{\text{и}}(T)$ , визначаючи модуль Юнга за формулою:

$$E_{\text{и}}(T) = E_{\text{пк}}(f_{\text{иТ}} / f_{\text{ик}}). \quad (1)$$

Опір втоми досліджених матеріялів при консольному згині на

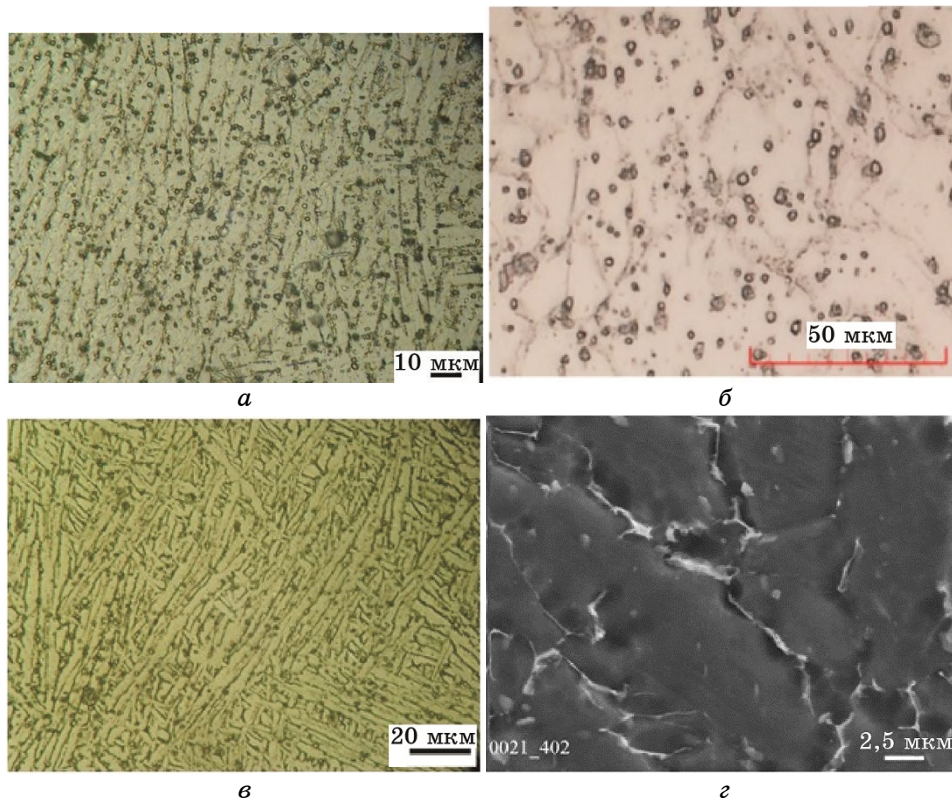
частоті 2 кГц проводили за методикою [14]. Руйнівні напруги зразка  $\sigma_a$  розраховували виходячи з пружної моделі деформування матеріалу при вимірюванні амплітуди його коливань в двох точках — на його вільному кінці  $A_0$  і в місці закріплення  $A_1$  при значеннях  $x = x^*$  — координати місця руйнування зразка від його вільного кінця:

$$\sigma_a = 2\pi f W_0 (3E\rho)^{0.5} [U(kx^*) + PV(kx^*)]. \quad (2)$$

де коефіцієнт  $P$  і аргумент  $kx$  функцій А. М. Крилова  $S, T, U, V$  визначали за формулою:

$$P = (-S(kl) - A_0 / A_1) / T(kl), \quad (3)$$

де  $l$  — довжина консольної частини стрижня,  $x$  — координата перерізу по довжині стрижня починаючи з його вільного кінця до місця



**Рис. 1.** Мікроструктура зразків сплаву ЖТ18-3 (а, б) та ЖТ19-4 (в, г).  
**Fig. 1.** Microstructure of ЖТ18-3 (а, б) and ЖТ19-4 (в, г) alloy samples.

руйнування.

Величину  $k$  визначали з формули

$$k^4 = f^2 b H \rho / EI, I = b H^3 / 12, \quad (4)$$

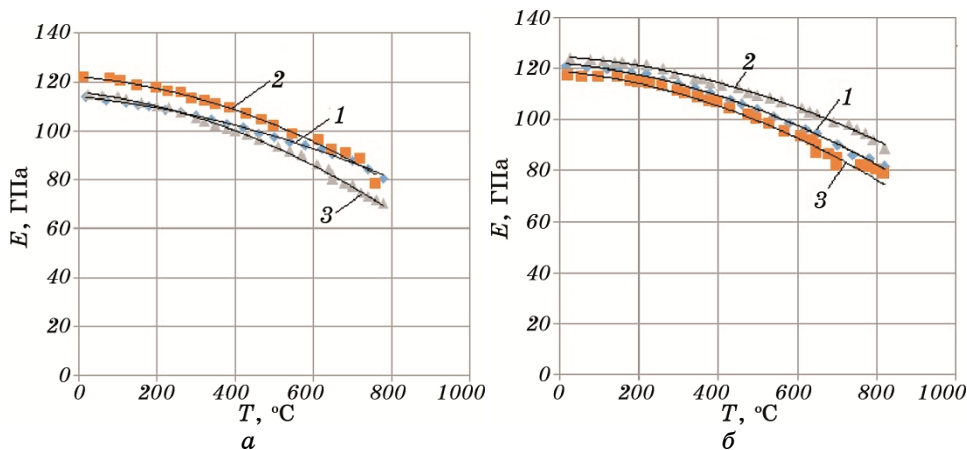
де  $I$  — момент інерції прямокутного перерізу стрижня,  $b$  — його ширина,  $H$  — товщина.

Аналіза систематичної похибки величин, що входять до формул для розрахунку напружень показав, що основний внесок в похибку розрахунку вносять вимірювання амплітуд (2%), модуля Юнга (2%) і густини (0,7%) досліджуваного матеріалу. Похибки визначення величин  $P$  і  $k$ , які входять в формулу (2), слабо впливають на точність розрахунків. Сумарна систематична похибка розрахунку напружень за формулою (3) склала 4,5%, а загальна похибка —  $\pm 4\%$ .

### 3. РЕЗУЛЬТАТИ

#### 3.1. Структура

Структуру досліджених матеріалів вивчали на зразках після шлі-



**Рис. 2.** Залежність  $E$  від  $T$  жароміцних титанових сплавів: 1 — ЖТ18-3 ( $E_{20} = 114$  ГПа), 2 — ЖТ19-4 ( $E_{20} = 122$  ГПа), 3 — ВТ6 ( $E_{20} = 115$  ГПа) (а), 1 — ЖТ19-3 ( $E_{20} = 122$  ГПа), 2 — 2Т85-3 ( $E_{20} = 117$  ГПа), 3 — ВТ25У ( $E_{20} = 124$  ГПа) (б).

**Fig. 2.** Dependence of  $E$  on  $T$  of heat-resistant titanium alloys: 1— ЖТ18-3 ( $E_{20} = 114$  GPa), 2—ЖТ19-4 ( $E_{20} = 122$  GPa), 3—ВТ6 ( $E_{20} = 115$  GPa) (а), 1— ЖТ19-3 ( $E_{20} = 122$  GPa), 2—2Т85-3 ( $E_{20} = 117$  GPa), 3—ВТ25У ( $E_{20} = 124$  GPa) (б).

**ТАБЛИЦЯ 2.** Температурні залежності модуля пружності титанових стопів.**TABLE 2.** Temperature dependence of the modulus of elasticity of titanium alloys.

Крива	Матеріал	Рівняння	$R^2$	$E$ , ГПа (при $x = 650^\circ\text{C}$ )
1	ЖТ18-3	$y = -3 \cdot 10^{-5}x^2 - 0,0169x + 114,02$	0,997	90,5
2	ЖТ19-4	$y = -5 \cdot 10^{-5}x^2 - 0,0134x + 122,1$	0,9885	92,3
3	ВТ6	$y = 298,6x^2 + 154,58x + 66,455$	0,9959	80,1
1	ЖТ19-3	$y = -2 \cdot 10^{-5}x^2 - 0,0375x + 123,76$	0,9933	92
2	2Т85-3	$y = -5 \cdot 10^{-5}x^2 - 0,0127x + 116,36$	0,9968	87
3	ВТ25У	$y = -2 \cdot 10^{-5}x^2 - 0,0335x + 124,44$	0,9937	94

фування, полірування та щавлення (рис. 1) Розмір зерна порівнювали за десятибальною шкалою мікроструктур [15]. За розміром зерна досліджені матеріали віднесені до 1 і 2 балу, тобто до дрібнозернистих структур. У мікроструктурі всіх зразків візуалізуються дрібні глобулярні включення частинок вторинних силіцидів із середнім розміром близько 0,1–0,3 мкм. Крім того у стопі ЖТ18-3 (рис. 1, а, б) показано наявність евтектичної силіцидної фази  $\text{Ti}_5\text{Si}_3$ , яка після пластичної деформації перетворилася в майже рівновісні частинки з середніми розмірами 1–5 мкм.

Мікроструктура стопу ЖТ19-4 (рис. 1, в, г) являє собою пластинчасту  $\alpha$ -фазу з прошарками залишкової  $\beta$ -фази між  $\alpha$ -пластинами та дисперсними виділеннями силіцидів на їх поверхні.

Розглядаючи залежності модуля пружності та циклічної міцності досліджених стопів від температури та числа циклів навантаження до руйнування, відмітимо наступне. З формули (2) слідує, що величина максимальних циклічних напружень  $\sigma_a$  в зразку залежить від величини  $E$  і тому обидві ці величини залежать від температури випробувань  $T$ . Фізичний сенс взаємопов'язаних характеристик  $\sigma_a$  і  $E$  різний і вимагає окремого розгляду в залежності від температури. Тому на початку розглянуті пружні властивості досліджуваних матеріалів, що визначаються відповідно до методик при низьких рівнях циклічних деформацій при кімнатній і високих температурах. Подальші дослідження  $\sigma_a$  від  $T$  проводили при плавному збільшенні амплітуди коливань  $A$  у формулі (3) в широкому діапазоні температур і часу навантаження на кожному рівні  $\sigma_a$  аж до початку руйнівних навантажень характерних для значень  $\sigma_a$  при втомі.

**ТАБЛИЦЯ 3.** Дані про густину, межі витривалости та його питомі величини, а також про модуль пружности і температурні коефіцієнти пружности досліджених матеріалів.

**TABLE 3.** Data on density, endurance limits and its specific values, as well as on the modulus of elasticity and temperature coefficients of elasticity of the studied materials.

№	Матеріал	$T_{\text{випр.}},$ °C	$\rho, \text{ кг/м}^3$	$\sigma_{-1},$ МПа	$\sigma_{-1}^{650} / \sigma_{-1}^{20}$	$E, \text{ ГПа}$	$E_{650}/E_{20}$
1	ВТ1-0	20	4510	190	—	112	0,25
		650				28	
2	ВТ6	20	4,34	480	0,521	115	0,696
		650		250		80	
3	ВТ-9 [11]	20	4510	620	—	118	—
		500		540			
4	ВТ25У	20	4865	531	0,550	123	0,766
		650		303		94	
5	ЖТ18-3	20	4420	571	—	114	0,791
		650		90			
6	ЖТ19-1 (вих.)	20	4580	462	—	122	0,770
		650		94			
7	ЖТ19-3	20	4580	560	0,418	122	0,754
		650		234		92	
8	ЖТ19-4	20	4580	528	—	124	0,744
		650		92,3			
9	2Т85-3	20	4340	726	0,481	117	0,743
		650		349		87	

### 3.2. Температурні залежності модуля Юнга

Випробування матеріалів проводили за наступною схемою: 1 — визначали модуль пружности при кімнатній температурі динамічною методою при поздовжніх коливаннях зразка, 2 — будували залежність  $E$  зразків при резонансних коливаннях згину зразка від  $T$  при нагріванні від 20 до  $T = 820^\circ\text{C}$  за приблизно 200 хв., визначаючи  $E$  за формулою (2). Результати випробувань представлені на рис. 2. Криві на рис. 2 описали залежностями у табл. 2.

Експериментальні залежності у таблиці 2 при  $x = T = 650^\circ\text{C}$  дозволили отримати температурні коефіцієнти пружности досліджених матеріалів  $E_{650}/E_{20}$ , які представлені в табл. 3. Вони характери-



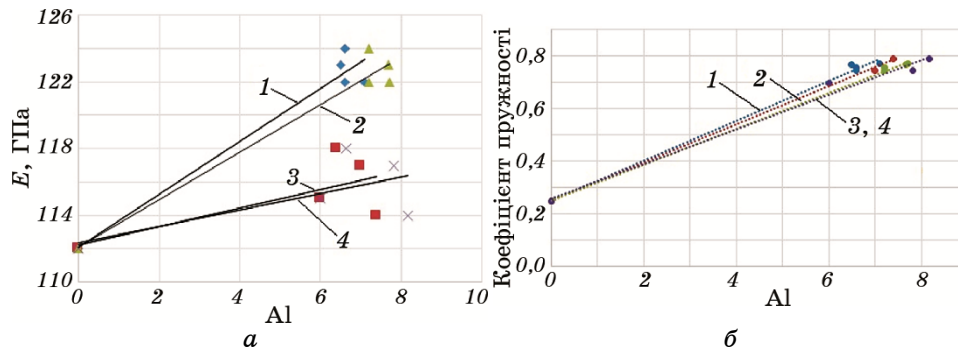
зують нахил кривих і, відповідно, опір пружних властивостей кристалічної ґратниці досліджених матеріалів підвищенню температури іспитів. Для порівняння з отриманими результатами в табл. 3 наведені також величини  $E_{650}/E_{20}$  для нежароміцних стопів ВТ1-0 та ВТ6, одержаних у роботі.

Одержані результати були використані для розрахунку напружень при високих температурах. Аналіза останніх колонок табл. 1 та 3 вказує на те, що значення температурного коефіцієнту пружності та втоми, пов'язані із вмістом Алюмінію.

### 3.2.1. Вплив вмісту Алюмінію на модуль пружності жароміцних титанових стопів

За даними таблиць 1–3 одержано залежності на рисунку 3, які показують вплив вмісту Al та  $[Al]_{\text{екв}}$  на модуль пружності та температурні коефіцієнти пружності досліджених стопів. Для більш детального аналізу досліджені матеріали поділили на дві групи: 1 група — ВТ25У, ЖТ19-1, ЖТ19-3, ЖТ19-4 з  $E > 120$  ГПа, а також 2 група — ВТ1-0, ВТ6, ВТ9, ЖТ18-3, 2Т85-3 з  $E < 120$  ГПа.

Різні нахили кривих 1, 2 відносно 3, 4 на рисунку 3, а зумовлені, очевидно, тим, що жароміцні титанові стопи мають в своєму складі  $\alpha$ - і  $\beta$ -фази з різним модулем пружності. Отримані криві дозволя-



**Рис. 3.** Залежність модуля пружності за кімнатної температури (а) і температурних коефіцієнтів пружності при 650°C (б) титанових стопів від вмісту Алюмінію. При цьому залежності 1, 2  $E$  від Al (% ваг.) та  $[Al]_{\text{екв}}$ , відповідно, стопів з  $E > 120$  ГПа, а залежності 3, 4  $E$  від Al (% ваг.) та  $[Al]_{\text{екв}}$ , відповідно, стопів з  $E < 120$  ГПа.

**Fig. 3.** Dependence of the modulus of elasticity at room temperature (a) and temperature coefficients of elasticity at 650°C (b) of titanium alloys on the aluminium content. At the same time dependences 1, 2 of  $E$  on Al (% wt.) and  $[Al]_{\text{eq}}$ , respectively, of alloys with  $E > 120$  GPa, and dependences 3, 4 of  $E$  on Al (% wt.) and  $[Al]_{\text{eq}}$ , respectively, alloys  $E < 120$  GPa.

ють кількісно прогнозувати зміни модуля пружності за кімнатної температури, а також температурного коефіцієнта пружності для температури  $650^{\circ}\text{C}$ , які підвищуються із зростанням вагового вмісту Алюмінію.

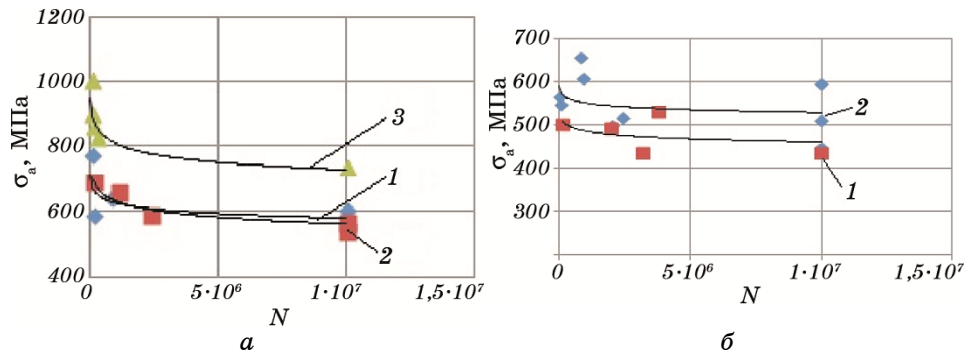
В основі визначених значень  $E$  лежать методики з мінімально можливими рівнями деформування, при яких рух дислокацій відсутній або мінімальний. При переході до дослідження впливу температури випробувань на втому потрібні інші моделі їх аналізу.

### 3.3. Опір втомі за кімнатної та високих температур

Дослідження циклічної міцності (за термінологією фізики міцності) або опору втомі (за термінологією механіки деформованого твердого тіла) традиційно засноване на побудові кривих втомі — залежності максимальних циклічних напружень  $\sigma_a$  в зразку матеріалу від тривалості циклів навантаження до руйнування  $N$ . В основі втомного руйнування лежать механізми розвитку локалізованої мікропластичної деформації матеріалу в умовах його макропружнього циклічного деформування в багатоциклової області втомі.

#### 3.3.1. Температура $20^{\circ}\text{C}$

На рисунку 4 представлено криві втомі деяких досліджених мате-



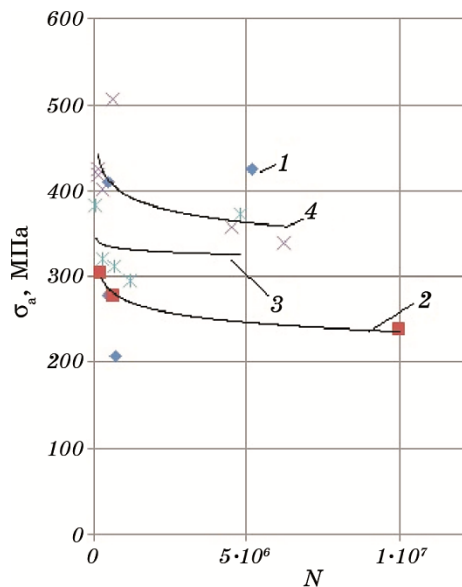
**Рис. 4.** Криві втомі  $\sigma_a$  від  $N$  жароміцних титанових сплавів за кімнатної температури: 1 — ЖТ18-3, 2 — ЖТ19-3, 3 — 2Т85-3 (а); 1 — ЖТ19-1, 2 — ЖТ19-4 (б). Крайні праві точки на кривих при  $N = 10^7$  циклів — незруйновані зразки.

**Fig. 4.** Fatigue curves  $\sigma_a$  from  $N$  heat-resistant titanium alloys at room temperature: 1 — ЖТ18-3, 2 — ЖТ19-3, 3 — 2Т85-3 (а); 1 — ЖТ19-1, 2 — ЖТ19-4 (б). The extreme right points on the curves at  $N = 10^7$  cycles are undamaged samples.

ріялів при кімнатній температурі, а в табл. 3 значення межі витривалости  $\sigma_{-1}$  досліджених матеріалів на базі  $N = 10^7$  циклів.

Представлені на рисунку 4 криві описали степеневими залежностями, які дозволяють розрахувати величину межі витривалости  $\sigma_{-1}$  на більшій базі навантаження, наприклад,  $N = 2 \cdot 10^7$  циклів (які іноді наводяться в літературі), оцінити зміни  $\sigma_{-1}$  в залежності від розкиду експериментальних точок, а також порівняти їх з відомими результатами: 1 —  $y = 1020,9x^{-0,026}$ ,  $R^2 = 0,5256$ , ЖТ18-3, при  $N = 10^7$   $\sigma_{-1} = 571$  МПа, 2 —  $y = 1336,6x^{-0,054}$ ,  $R^2 = 0,8818$ , ЖТ19-3, при  $N = 10^7$   $\sigma_{-1} = 560$  МПа, 3 —  $y = 1573,1x^{-0,048}$ ,  $R^2 = 0,8742$ , 2Т85-3, при  $N = 10^7$   $\sigma_{-1} = 726$  МПа (а); 1 —  $y = 669,16x^{-0,022}$ ,  $R^2 = 0,1872$ , ЖТ19-1, при  $N = 10^7$   $\sigma_{-1} = 462$  МПа, 2 —  $y = 705,65x^{-0,019}$ ,  $R^2 = 0,1185$ , ЖТ19-4, при  $N = 10^7$   $\sigma_{-1} = 528$  МПа, 3 —  $y = 1573,1x^{-0,048}$ ,  $R^2 = 0,8742$ , 2Т85-3, при  $N = 10^7$   $\sigma_{-1} = 726$  МПа (б).

Аналіза положення експериментальних точок і показника достовірності  $R^2$  показала великий розкид даних для ЖТ18-3, ЖТ19-1 і ЖТ19-4. Це вказує на їх низькі пластичні властивості при кімнатній температурі і, в результаті цього, чутливість до дефектів структури. Відзначимо, що жароміцний титановий сплав 2Т85-3 (ступінь



**Рис. 5.** Криві втоми і окремі експериментальні точки жароміцних титанових сплавів при 650°C: 1 — ЖТ18-3 після ТО (◆), 2 — ЖТ19-1 після ТО (■), 3 — ЖТ19-3 (\*), 4 — 2Т85-3 (×).

**Fig. 5.** Fatigue curves and individual experimental points of heat-resistant titanium alloys at 650°C: 1—ЖТ18-3 after maintenance (◆), 2—ЖТ19-1 after maintenance (■), 3—ЖТ19-3 (\*), 4—2Т85-3 (×).

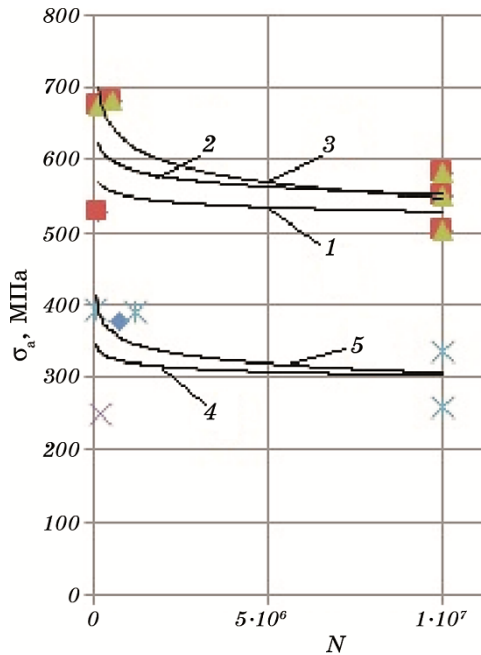
деформації 85,3%) має при кімнатній температурі межу міцності  $\sigma_b = 1318\text{--}1336$  МПа, відносне подовження  $\delta = 3,4\text{--}4,8\%$  [9], а межу витривалости на базі  $10^7$  циклів  $\sigma^{-1} = 726$  МПа.

### 3.3.2. Температура 650 °C

Результати випробувань на втому зазначених матеріалів при температурі 650°C представлені на рис. 5 та 6 (для кімнатної та високої температур), а загальні результати випробувань — на рис. 7.

Криві на рисунку 5 представлені степеневими залежностями: 2 —  $y = 658,84x^{-0,0164}$ ,  $R^2 = 0,9845$ , ЖТ19-1 після термічного оброблення (ТО), при  $N = 10^7$   $\sigma_{-1} = 234$  МПа, при  $N = 2 \cdot 10^7$   $\sigma_{-1} = 224$  МПа, 3 —  $y = 399,06x^{-0,012}$ ,  $R^2 = 0,035$ , ЖТ19-3 після ТО, при  $N = 10^7$   $\sigma_{-1} = 324$  МПа, при  $N = 2 \cdot 10^7$   $\sigma_{-1} = 327$  МПа, 4 —  $y = 847,04x^{-0,055}$ ,  $R^2 = 0,4226$ , 2Т85-3, при  $N = 10^7$   $\sigma_{-1} = 349$  МПа, при  $N = 2 \cdot 10^7$   $\sigma_{-1} = 336$  МПа.

Порівняно високі значення опору втоми при температурі 650°C показав матеріал ЖТ18-3 — точка 1 на рис. 5. Однак для нього ха-



**Рис. 6.** Криві втоми  $\sigma_a$  від  $N$  титанового сплаву BT25U: 1–3 — при кімнатній температурі, 4, 5 — при 650°C.

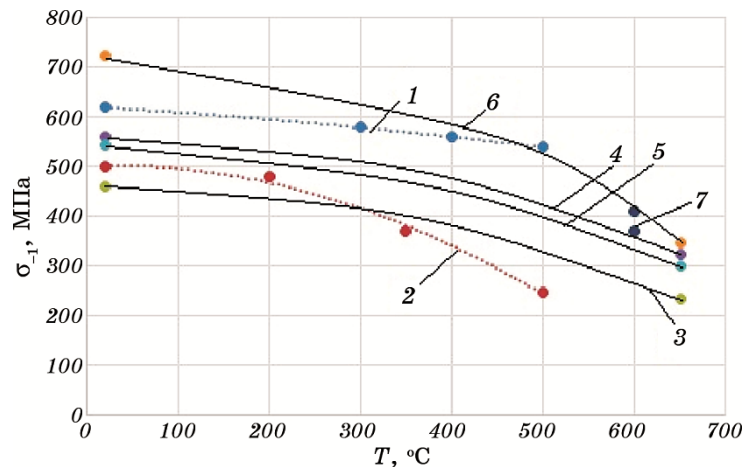
**Fig. 6.** Fatigue curves  $\sigma_a$  from  $N$  titanium alloy BT25U: 1–3 at room temperature, 4, 5 at 650°C.

рактерний великий розкид експериментальних даних. Ще більш високий розкид експериментальних точок показав матеріал ЖТ18-3 після ТО. Це призвело до того, що криві втоми цих матеріалів побудувати не вдалося. Для матеріалів 2Т85-3 і ЖТ19-3 після ТО розкид точок менше (як і при кімнатній температурі), втомні криві побудувати вдалося. Розрахункові значення межі витривалості при  $650^{\circ}\text{C}$  на базі  $N = 2 \cdot 10^7$  цих матеріалів мають  $\sigma_{-1} = 336$  і  $324$  МПа, відповідно.

Для оцінки впливу розкиду експериментальних точок на межу витривалості на рис. 6 застосовували наступний прийом. Спочатку будували криву втоми для всіх отриманих точок, а потім відсіювали одну чи дві точки, які були найдальші від першої кривої і знов будували криві втоми і визначали  $\sigma_{-1}$ .

При  $20^{\circ}\text{C}$ :  $1 - y = 698,93x - 0,017$ ,  $R^2 = 0,0309$  (використані всі експериментальні точки), при  $N = 2 \cdot 10^7$   $\sigma_{-1} = 531$  МПа,  $2 - y = 858,34x - 0,027$ ,  $R^2 = 0,2279$  (без однієї точки, розташованої далеко від інших), при  $N = 10^7$   $\sigma_{-1} = 555$  МПа,  $3 - y = 1343x - 0,056$ ,  $R^2 = 0,7746$  (без двох точок, розташованих далеко від інших), при  $N = 10^7$   $\sigma_{-1} = 545$  МПа.

При  $650^{\circ}\text{C}$ :  $4 - y = 453x - 0,025$ ,  $R^2 = 0,0739$  (використані всі експериментальні точки), при  $N = 10^7$   $\sigma_{-1} = 303$  МПа, при  $N = 2 \cdot 10^7$



**Рис. 7.** Вплив температури випробувань на межу витривалості на базі  $10^7$  циклів жароміцних титанових сплавів:  $1 - \text{ВТ9}$  [11],  $2 - \text{ВТ6}$  [11],  $3 - \text{ЖТ19-1}$  вих. і після ТО,  $4 - \text{ЖТ19-3}$  після термооброблення,  $5 - \text{ВТ25У}$ ,  $6 - 2\text{T85-3}$ ,  $7 - \text{ВТ41}$  [8].

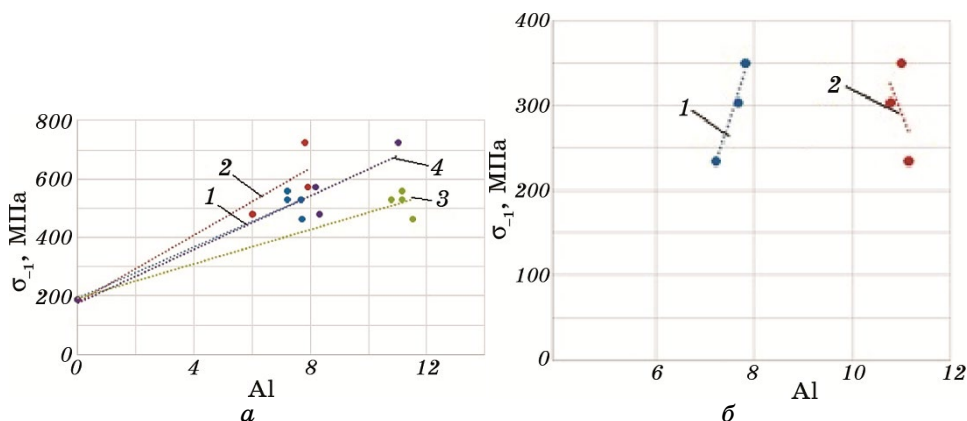
**Fig. 7.** The influence of test temperature on the endurance limit based on  $10^7$  cycles of heat-resistant titanium alloys:  $1 - \text{ВТ9}$  [11],  $2 - \text{ВТ6}$  [11],  $3 - \text{ЖТ19-1}$  out and after maintenance,  $4 - \text{ЖТ19-3}$  after heat treatment,  $5 - \text{ВТ25У}$ ,  $6 - 2\text{T85-3}$ ,  $7 - \text{ВТ41}$  [8].

$\sigma_{-1} = 282$  МПа,  $5 - y = 762,39x - 0,057$ ,  $R^2 = 0,5286$  (без однієї точки, розташованої далеко від інших), при  $N = 10^7$   $\sigma_{-1} = 300$  МПа.

Загальна картина відомих з [8, 11] та одержаних в даній роботі даних про вплив температури випробувань на межу витривалості при згині жароміцних титанових стопів представлена на рис. 7. Їх було побудовано в умовах обмеженої кількості експериментальних точок і тому виходили з таких міркувань.

Як було показано вище, стоп 2Т85-3 має температурний коефіцієнт пружності  $E_{650}/E_{20} = 0,743$ , який нижче, ніж у відомого стопу ВТ25У. З даних таблиці 3 випливає аналогічний висновок і для температурних коефіцієнтів втоми  $\sigma_{-1}^{650} / \sigma_{-1}^{20}$  для цих конкуруючих стопів. Це вказує на кореляцію між характеристикою, яку важко визначити,  $\sigma_{-1}^{650} / \sigma_{-1}^{20}$ , і характеристикою, яку порівняно легко визначити,  $E_{650}/E_{20}$ , для досліджених матеріалів у зазначеному діапазоні зміни температур. Очевидно, що криві 3–6 досліджених матеріалів містять лише дві експериментальні точки  $\sigma_{-1}$  і тому допускають, формально, проведення через них будь-якої кількості кривих. Однак, з огляду на вищевикладене, їх провели опуклими по аналогії з температурними залежностями модуля Юнга цих матеріалів, а також з нахилами наближеними до відомих з літератури температурних залежностей меж витривалості на рис. 7 — кривих 1 (ВТ9) і 2 (ВТ6). Тому криві 3, 4, 6 і 7 мають попередній і орієнтовний характер.

З рисунку 7 слідує, що температурна залежність меж витрива-



**Рис. 8.** Залежність меж витривалості жароміцних матеріалів від вмісту Al (% ваг.) та  $[Al]_{\text{екв}}$  (%): при 20°C (1, 2 для 1 та 2 групи) та  $[Al]_{\text{екв}}$  (3, 4 для 1 та 2 групи) (а), при 650°C (1 — від вмісту Al), 2 — від вмісту  $[Al]_{\text{екв}}$  (б).

**Fig. 8.** Dependence of endurance limits of heat-resistant materials on the content of Al (% wt.) and  $[Al]_{\text{eq}}$  (%): at 20°C (1, 2 for groups 1 and 2) and  $[Al]_{\text{eq}}$  (3, 4 for groups 1 and 2) (a), at 650°C (1 from Al content, 2 from  $[Al]_{\text{eq}}$  content) (b).

лости нового жароміцного стопу 2Т85-3 перевищує відомі результати до температури випробувань 500°C. При температурі 600°C близна залежність  $\sigma_{-1}$  від  $T$  для 2Т85-3 практично збігається з даними  $\sigma_{-1}$  для двох модифікацій стопу ВТ41 [8].

Якщо зіставити величини межі витривалості при 650°C з вмістом Al та з  $[Al]_{\text{екв}}$  в складі жароміцних титанових стопів, то з даних табл. 1 та 3 одержимо залежності на рис. 8, а: 1 —  $y = 3,509x + 194,71$ ,  $R^2 = 0,9158$  (1 гр. від. Al), 2 —  $y = 7,319x + 180,51$ ,  $R^2 = 0,8977$  (2 гр. від. Al), 3 —  $y = 9,262x + 193,07$ ,  $R^2 = 0,9252$  (1 гр. від.  $[Al]_{\text{екв}}$ ), 4 —  $y = 45,967x + 175,95$ ,  $R^2 = 0,9434$  (2 гр. від.  $[Al]_{\text{екв}}$ ).

Оскільки значення  $R_2$  для залежностей  $\sigma_{-1}$  від %  $[Al]_{\text{екв}}$  при 20°C вищі ніж для залежностей  $\sigma_{-1}$  від Al ваг., то використання показника %  $[Al]_{\text{екв}}$  виправдане. Але при 650°C залежностей  $\sigma_{-1}$  від %  $[Al]_{\text{екв}}$  у порівняння з Al % ваг. мають протилежний вплив і потребують подальшого дослідження.

#### 4. ВИСНОВКИ

1. Отримано зростаючу залежність модуля Юнга та температурного коефіцієнта пружності від вмісту Алюмінію та його еквіваленту для відомих та нових жароміцних титанових стопів.
2. При кімнатній температурі найбільш високі значення межі витривалості має стоп 2Т85-3 — на 100 МПа вище, ніж у відомого стопу ВТ9.
3. Показано зв'язок між нахилами температурних залежностей модуля пружності і межі витривалості. На основі цього побудовано орієнтовні опуклі температурні залежності межі витривалості.
4. Встановлено, що досліджені в роботі експериментальні стопи серій 2Т85, ЖТ18 і ЖТ19 знаходяться на одному рівні або перевищують промислові титанові стопи ВТ9 і ВТ25У за величиною межі витривалості при температурах до 500°C. При температурі 600°C для експериментального стопу 2Т85-3 з великим вмістом Силіцію значення багатоциклової втоми збігаються з такими для відомого стопу ВТ41.
5. Додаткове термічне оброблення після деформації погіршило втомні властивості експериментальних стопів ЖТ-18 і ЖТ-19.

#### ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. S. A. Firstov, S. V. Tkachenko, and N. N. Kuz'menko, *Metal Sci. Heat Treatment*, **51**: 12 (2009).
2. Q. B. Kuang, L. M. Zou, Y. X. Cai, X. Liu, and H. W. Xie, *Mater. Trans.*, **58**, No. 12: 1735 ((2017)).
3. M. M. Kuz'menko, *Mater. Sci.*, **44**: 49 (2008).
4. М. М. Кузьменко, *Сучасні проблеми фізичного матеріалознавства*, № 16:

- 118 (2007).
5. P. Cavaliere, M. El. Mehtedi, E. Evangelista, N. Kuzmenko, and O. Vasylyev, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, **37**, Iss. 10: 1514 (2006).
  6. S. A. Firstov, O. P. Ostash, Yu. F. Lugovskoi, N. N. Kuz'menko, L. D. Kulak, and S. A. Spiridonov, *Mater. Sci.*, **50**: 55 (2014).
  7. S. O. Firstov, L. D. Kulak, and M. M. Kuz'menko, *Mater. Sci.*, **54**: 783 (2019).
  8. Т. В. Павлова, О. С. Кашапов, Н. А. Ночовная, *Труды ВИАМ* (2011).
  9. Ю. Ф. Луговський, Л. Д. Кулак, М. М. Кузьменко, О. В. Дацкевич, С. А. Спиридонов, *Електронна мікроскопія і міцність матеріалів*, № 21: 53 (2015).
  10. O. P. Ostash, A. D. Ivasyshyn, L. D. Kulak, and M. M. Kuz'menko, *Mater. Sci.*, **44**: 360 (2008).
  11. Б. А. Грязнов, С. С. Городецкий, Ю. С. Налимов и др., *Усталость жаропрочных сплавов и рабочих лопаток ГТД* (Ред. В. Т. Троценко) (Киев: Наукова думка: 1992).
  12. В. А. Кузьменко, *Звуковые и ультразвуковые колебания при динамических испытаниях материалов* (Киев: Издательство АН УССР: 1963).
  13. Ю. Ф. Луговський, В. А. Кузьменко, *Авторське свідоцтво УРСР № 1769066* (Опубліковано 15 жовтня 1992 р.).
  14. Ю. Ф. Луговський, *Проблемы специальной электрометаллургии*, № 4: 61 (1987).
  15. *ГОСТ 26492-85. Прутки катаные из титана и титановых сплавов.*

## REFERENCES

1. S. A. Firstov, S. V. Tkachenko, and N. N. Kuz'menko, *Metal Sci. Heat Treatment*, **51**: 12 (2009).
2. Q. B. Kuang, L. M. Zou, Y. X. Cai, X. Liu, and H. W. Xie, *Mater. Trans.*, **58**, No. 12: 1735 (2017).
3. M. M. Kuz'menko, *Mater. Sci.*, **44**: 49 (2008).
4. M. M. Kuz'menko, *Suchasni Problemy Fizychnoho Materialoznavstva*, No. 16: 118 (2007) (in Ukrainian).
5. P. Cavaliere, M. El. Mehtedi, E. Evangelista, N. Kuzmenko, and O. Vasylyev, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, **37**, Iss. 10: 1514 (2006).
6. S. A. Firstov, O. P. Ostash, Yu. F. Lugovskoi, N. N. Kuz'menko, L. D. Kulak, and S. A. Spiridonov, *Mater. Sci.*, **50**: 55 (2014).
7. S. O. Firstov, L. D. Kulak, and M. M. Kuz'menko, *Mater. Sci.*, **54**: 783 (2019).
8. T. V. Pavlova, O. S. Kashapov, and N. A. Nochovnaya, *Trudy VIAM* (2011) (in Russian).
9. Yu. F. Luhovs'kyy, L. D. Kulak, M. M. Kuz'menko, O. V. Datskevych, and S. A. Spyridonov, *Elektronna Mikroskopiya i Mitsnist' Materialiv*, No. 21: 53 (2015) (in Ukrainian).
10. O. P. Ostash, A. D. Ivasyshyn, L. D. Kulak, and M. M. Kuz'menko, *Mater. Sci.*, **44**: 360 (2008).
11. B. A. Gryaznov, S. S. Gorodetskiy, Yu. S. Nalimov et al., *Ustalost' Zharo-prochnykh Splavov i Rabochikh Lopatok GTD* [Fatigue of Heat-Resistant Alloys



- and Working Blades of the Gas Turbine Engine] (Ed. V. T. Troshchenko) (Kiev: Naukova Dumka: 1992) (in Russian).
12. V. A. Kuz'menko, *Zvukovye i Ul'trazvukovye Kolebaniya pri Dinamicheskikh Ispytaniyakh Materialov* [Sonic and Ultrasonic Vibrations in Dynamic Testing of Materials] (Kiev: Izdatel'stvo AN USSR: 1963) (in Russian).
  13. Yu. F. Luhovs'kyi and V. A. Kuz'menko, *Author's Certificate USSR No. 1769066* (Published October 15, 1992) (in Ukrainian).
  14. Yu. F. Lugovs'kiy, *Problemy Spetsial'noy Elektrometallurgii*, No. 4: 61 (1987) (in Russian).
  15. *GOST 26492-85. Prutki Katanye iz Titana i Titanovykh Splavov* [Bars Rolled from Titanium and Titanium Alloys] (in Russian).