

УДК 620.197:669.788

ВПЛИВ ГАЗОПОДІБНОГО ВОДНЮ НА ВЛАСТИВОСТІ ЖАРОМІЦНОГО НІКЕЛЬКОБАЛЬТОВОГО СПЛАВУ ЗА СТАТИЧНИХ І ЦИКЛІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ

О. І. БАЛИЦЬКИЙ^{1,2}, А. М. СИРОТЮК¹, Л. М. ІВАСЬКЕВИЧ¹

¹ Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів;

² Західнопоморський технологічний університет у Щеціні, Польща

Досліджено вплив водню за тисків до 65 МПа на міцність, пластичність і малоцикло-ву довговічність зразків зі сплаву ХН60КМЮБВТФ за температур 293...1073 К, швидкостей короткочасного розтягу 0,1...100 mm/min, частоти і амплітуди циклічного згину 50 Hz та 0,8 і 1,6%, відповідно. Встановлено, що характеристики зразків зменшуються зі зростанням тиску водню, зниженням швидкості і амплітуди навантаження у водні. За максимального окрихнення при тиску водню 65 МПа і швидкості розтягу 0,1 mm/min границя міцності та істинне напруження розриву гладких зразків зменшуються у 1,5 раза, а границя міцності зразків із концентратором напружень – більш ніж у два рази. При цьому відбувається крихке міжзеренне руйнування і практично повністю відсутня пластична деформація зразків. З підвищенням температури вплив водню зменшується, однак залишається відчутним до 1073 К.

Ключові слова: жароміцний нікелькобальтовий сплав, водневе окрихнення, малоциклова довговічність, міцність, пластичність.

The influence of hydrogen at pressures up to 65 MPa on the strength, plasticity, and low-cycle fatigue life of the ХН60КМЮБВТФ alloy samples at temperatures of 293...1073 K, short-term tensile rates of 0.1...100 mm/min, and cyclic bending frequencies and amplitudes of 50 Hz and 0.8 and 1.6% was studied. The properties of the samples decrease with increasing hydrogen pressure, decreasing speed and amplitude of loading in hydrogen. Under the maximum embrittlement at a hydrogen pressure of 65 MPa and a tensile rate of 0.1 mm/min, the ultimate strength and true fracture stress of smooth samples decrease in 1.5 times, and the ultimate strength of samples with a stress concentrator decreases in more than two times. In this case brittle intergranular fracture occurs and plastic deformation of the samples is almost completely absent. With increasing temperature the effect of hydrogen decreases, but remains noticeable at 1073 K.

Keywords: heat-resistant nickel-cobalt alloy, hydrogen embrittlement, low-cycle durability, strength, plasticity.

Вступ. На диски і лопатки гарячого тракту газотурбінних установок (ГТУ) високого і низького тиску під час експлуатації впливають статичні та циклічні навантаження у широкому діапазоні температур і агресивні робочі гази та продукти їх згоряння [1–7]. Ці деталі традиційно виготовляють із деформівних, порошкових і литих жароміцних сплавів на нікелевій основі [2–4, 7, 8]. Високі характеристики жароміцності досягають додатками тугоплавких металів і виділеннями інтерметалідів та карбідів [1–6]. Для захисту від високотемпературної корозії сплави легують хромом, алюмінієм, танталом, ренієм, рутенієм і гафнієм, які забезпечують формування стабільних захисних оксидних плівок типу Al_2O_3 та Cr_2O_3 [4–6, 8, 9]. Диски ГТУ працюють у діапазоні температур фазових перетворень, а через велику кількість легувальних елементів сплави структурно неста-

Контактна особа: О. І. БАЛИЦЬКИЙ, e-mail: balitski@ipm.lviv.ua

більші. Тому для запобігання виділенню за робочих температур шкідливих крихких фаз, які різко погіршують експлуатаційні характеристики, експериментально та теоретично досліджують структурні перетворення і роль карбідів та інтерметалідів у руйнуванні [2, 7–11]. Такі дослідження особливо важливі, оскільки, окрім традиційного застосування водню для охолодження турбоагрегатів [12], все інтенсивніше розвивають водневу енергетику із воденьвмісним паливом [13–15]. Відомо, що застосовувані у аерокосмічній, хімічній та нафтогазовій промисловості, енергетичному, атомному й автомобілебудуванні корозійнотривкі жароміцні нікелеві сплави чутливі до водневого окрихчення [16–19]. Обумовлене воднем зниження міцності, пластичності, втомної довговічності та тріщиностійкості суттєво залежить від хімічного складу та структури цих матеріалів і може бути причиною катастрофічного руйнування [20–24]. Тому для безпечного використання у виробках водневої енергетики відомих сплавів, з яких виготовляють диски ГТУ, необхідно сформулювати базу даних з їх механічними характеристиками у наводнювальних середовищах.

Нижче подані результати експериментальних досліджень впливу тиску водню, температури випробувань, швидкості короточасного розтягу, частоти і амплітуди навантаження згином на міцність, пластичність і малоциклову довговічність жароміцного нікелькобальтового сплаву.

Матеріали та методика випробувань. Досліджували жароміцний сплав ХН60КМЮБВТФ (ЭП962), який використовують для виготовлення навантажених дисків турбін і компресорів за температур до 1023 К [2]. Сплав містить (mass%) 0,12 С; 0,28 Si; 14,2 Cr; 11,1 Со; 2,61 Мо; 2,62 W; 2,58 Ti; 3,52 Al; 0,5 V; 3,4 Nb, а також 0,01 В; 0,06 Zr і 0,06 Cu, які підвищують його робочі характеристики і технологічність, а бор та мідь також зменшують чутливість жароміцних нікелевих сплавів до водневого окрихчення [22, 24, 25]. Вміст основних елементів та домішок визначали хімічним методом, додатки рідкісноземельних металів – хіміко-спектральним аналізом. Після термічної обробки (гартування в оливу від 1383 К після витримки 3 h, ступінчасте старіння за 1023 К, 32 h і 1123 К, 6 h) сплав містить карбіди, борида та інтерметалідну γ' -фазу типу $(\text{Ni, Cr, Fe})_3(\text{Nb, Al, Ti, Mo})$ у кількості до 45%. Істинне напруження розриву S_k , характеристики міцності (σ_B , $\sigma_{0,2}$, σ_B^n) та пластичності (δ , ψ , ψ^n) гладких і надрізаних зразків за кімнатної температури подані у таблиці.

**Механічні властивості за кімнатної температури і швидкості розтягу
1 mm/min та малоциклова довговічність за частоти 0,5 Hz
зразків з досліджуваного сплаву у повітрі (чисельник)
та водні за тиску 35 МПа (знаменник)**

Механічні властивості							Кількість циклів до руйнування	
S_k	σ_B	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	σ_B^n	ψ^n		
МПа			%		МПа	%	$\epsilon = 0,8\%$	$\epsilon = 1,6\%$
<u>1520</u> 1140	<u>1340</u> 1080	<u>1120</u> 1040	<u>8</u> 1	<u>14</u> 5	<u>2090</u> 1020	<u>13</u> 1	<u>19111</u> 1011	<u>1971</u> 134

Примітка: σ_B^n і ψ^n – для надрізаних зразків.

Чутливість сталей та сплавів до дії водню суттєво залежить від швидкості навантаження [14, 15, 26], тому гладкі п'ятикратні циліндричні зразки діаметром робочої частини 5 mm і зразки з надрізом ($\varnothing$ 7 mm, глибина надрізу 1 mm, радіус 0,1 mm) випробовували на короточасний розтяг в інтервалі швидкостей 0,1... 100 mm/min. Істинне напруження розриву обчислювали за формулою

$S_k = \sigma_B(1 + e_k)$, де $e_k = \ln(1/(1 - \psi))$. Малоциклову довговічність (кількість циклів до руйнування N) визначали за жорсткого чистого віднульового згину з амплітудами 0,8 і 1,6% та частотою 0,5 Hz на шліфованих плоских зразках із робочою частиною $3 \times 6 \times 20$ mm. За кімнатної температури випробовували у повітрі, за підвищеної – у гелії за тиску 10 МПа і водні за тисків до 65 МПа після дворазового вакуумування робочої камери до тиску 0,13 Pa та проміжним її промиванням воднем. Використовували додатково очищений та осушений блоком каталітичного очищення водень із сумарним вмістом кисню і водяної пари до $0,004 \text{ g/m}^3$. Вміст домішок визначали на автоматичному хроматографі ХТМ 73-Л. Ступінь водневого окрихчення оцінювали за коефіцієнтом β , рівним співвідношенню характеристик пластичності або кількості циклів до руйнування у водні та повітрі.

Фрактографічний аналіз зламів зразків здійснювали на електронному мікроскопі EVO-40XVP у Центрі електронної мікроскопії та рентгенівського мікроаналізу Фізико-механічного інституту ім. Г. В. Карпенка НАН України.

Результати та їх обговорення. Характеристики міцності досліджуваного сплаву в повітрі (див. таблицю) після стандартної термічної обробки значно вищі, ніж інших аналогічних матеріалів [2, 3, 7, 11, 13, 14, 27]. Зразки зі сплаву мають низьку пластичність і високу чутливість до концентрації напружень. Границя короточасної міцності зразків із надрізом σ_B^n у 1,5 раза більша, ніж гладких σ_B (рис. 1). Таке поєднання механічних властивостей свідчить про неоднорідні ділянки із високими локальними напруженнями і концентраціями водню у структурі сплаву, що спричиняє особливості його водневого окрихчення. Як і для всіх матеріалів [15, 16, 20, 23], вплив водню посилюється зі збільшенням його тиску (рис. 1a) і зменшенням швидкості навантаження (рис. 1b). Однак, на відміну від багатьох аустенітних жароміцних сталей та сплавів [15, 16, 19–26], водень відчутно погіршує характеристики міцності S_k , σ_B і σ_B^n і навіть границю плинності $\sigma_{0,2}$ зразків зі сплаву ХН60КМЮБВТФ (див. таблицю; рис. 1). За максимального окрихчення, яке досягається при поєднанні швидкості розтягу $0,1 \text{ mm/min}$ і тиску водню 35 МПа або швидкості 1 mm/min і тиску водню 65 МПа, границя міцності та істинне напруження розриву гладких зразків зменшуються у 1,5 раза, а границя міцності зразків із концентратором напружень – більш ніж удвічі. Друга особливість – настільки сильний вплив водню на характеристики пластичності, що за вказаних вище умов зразки руйнуються практично без пластичної деформації (рис. 2 і 3), а діаграма напруження–деформація має вигляд, характерний для крихкого руйнування (рис. 4, крива 2). На зламах зразків, зруйнованих у повітрі, присутні ділянки міжзеренного відколу і невелика частка в'язкого кризьзеренного руйнування, тоді як за присутності водню злам повністю крихкий міжзеренний із великою кількістю вторинних мікротріщин (рис. 5).

Особливо суттєво погіршуються під дією водню властивості зразків із концентратором напружень (рис. 1 і 2), відносно поперечне звуження яких знижується у водні за тиску 10 МПа на 90% (рис. 3, крива 3), що обумовлено характером розподілу напружень у гладких і надрізаних зразках. У зразках без концентраторів нормальні та дотичні напруження поступово збільшуються за наближення до осі зразка і руйнування у нейтральному середовищі починається саме в його серединних областях [23, 31]. За кільцевого концентратора і відсутності локальної плинності, що характерно для матеріалів із високою міцністю, біля вершини надрізу напруження набагато вищі, ніж у гладкого зразка. У водневому середовищі дифузія у полі напружень ефективніше, ніж характерне для пластичних матеріалів транспортування водню рухомими дислокаціями [16, 17, 28], впливає на його накопичення у вершині надрізу або тріщини і призводить до інтенсивного водневого окрихчення.

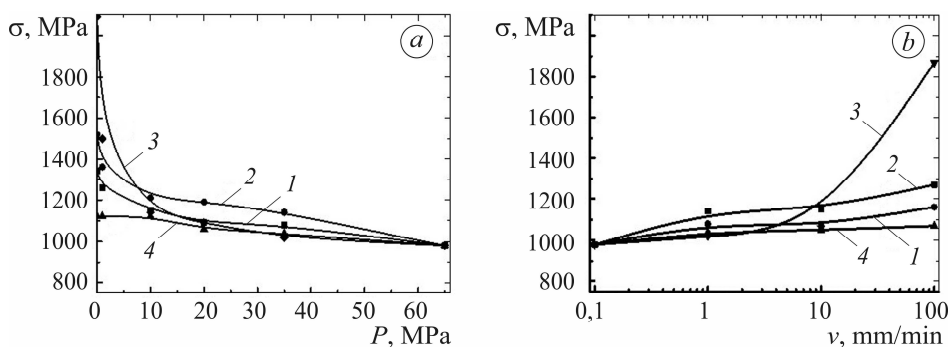


Рис. 1. Залежності істинного напруження розриву (2), границі міцності зразків із надрізом (3) та гладких зразків (1) і границі плинності (4) від тиску водню за швидкості розтягу 1 mm/min (a) і від швидкості розтягу за тиску водню 35 MPa (b).

Fig. 1. Dependences of true fracture stress (2), ultimate strength of notched specimens (3) and smooth specimens (1) and yield strength (4) on hydrogen pressure at a tension rate of 1 mm/min (a) and tension rate under a hydrogen pressure of 35 MPa (b).

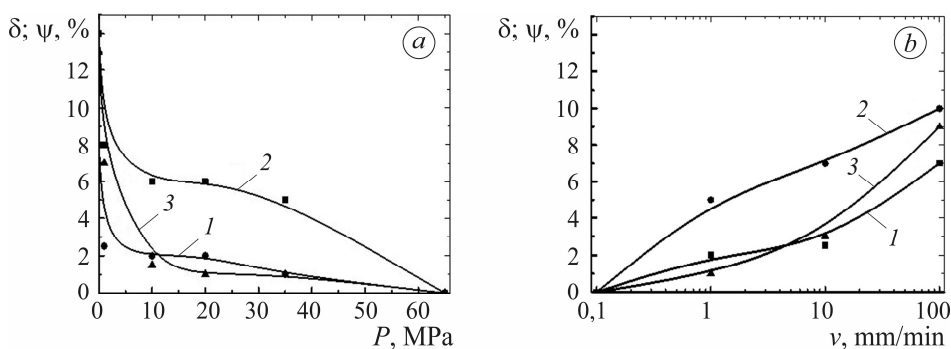
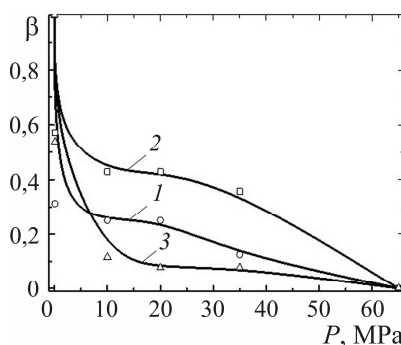


Рис. 2. Залежності відносних видовження (1) і поперечного звуження гладких зразків (2) та зразків із надрізом (3) від тиску водню за швидкості розтягу 1 mm/min (a) і швидкості розтягу за тиску водню 35 MPa (b).

Fig. 2. Dependences of relative elongation (1) and lateral reduction in area of smooth (2) and notched specimens (3) on hydrogen pressure at tension rate of 1 mm/min (a) and tension rate under a pressure of 35 MPa (b).

Рис. 3. Залежність коефіцієнта впливу водню на відносні видовження (1) і поперечне звуження гладких зразків (2) та зразків із надрізом (3) від тиску водню.

Fig. 3. Dependence of the hydrogen influence coefficient on the relative elongation (1) and lateral reduction in area of smooth (2) and notched specimens (3) on hydrogen pressure.



Температурні залежності механічних властивостей сплаву в інертному середовищі типові для таких жароміцних нікелькобальтових матеріалів [16, 20, 23, 29]. Границі міцності та плинності слабо змінюються в інтервалі температур 293...973 К і різко знижуються з подальшим її підвищенням до 1073 К (рис. 6, криві 3, 5). Майже стабільні значення характеристик пластичності і, відповідно, істинного напруження розриву зберігаються за 293...873 К (рис. 6, крива 1,

рис. 7, криві 1, 3). У цьому ж температурному інтервалі виявлено суттєвий вплив водню на всі властивості сплаву (рис. 6, криві 2, 4, 6; рис. 7, криві 2, 4). Як і для литих та порошкових жароміцних сплавів на нікелевій основі [29, 30], водневе окрихчення зберігається і за 1073 К, тобто за робочих температур матеріалів дисків та лопаток ГТУ.

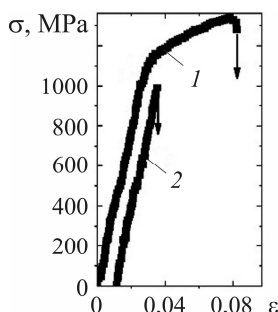


Рис. 4. Діаграми напруження–деформація гладких зразків у повітрі (1) та у водні за тиску 35 МПа і швидкості розтягу 0,1 мм/мін (2).

Fig. 4. Stress–strain curves of smooth specimens in air (1) and hydrogen (2) at a pressure of 35 MPa and a tension rate of 0.1 mm/min.

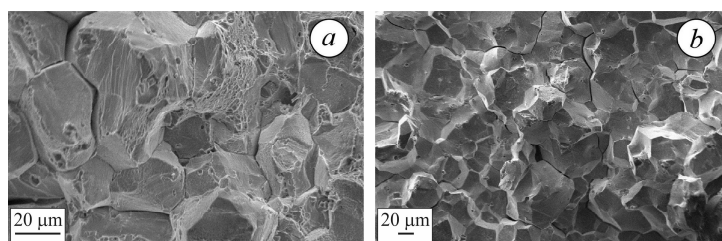


Рис. 5. Мікротрощини гладких зразків після статичного розтягу у повітрі (а) та водні за тиску 35 МПа і швидкості розтягу 0,1 мм/мін (b).

Fig. 5. Microfractures of smooth specimens after static tension in air (a) and in hydrogen at a pressure of 35 MPa and a tension rate of 0.1 mm/min (b).

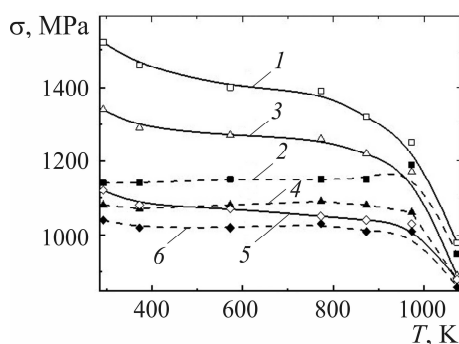


Рис. 6. Fig. 6.

Рис. 6. Температурні залежності істинного напруження розриву (1, 3), границь міцності (2, 4) і плинності (5, 6) у гелії (10 МПа) (1, 3, 5) та водні (35 МПа) (2, 4, 6) за швидкості розтягу 1 мм/мін.

Fig. 6. Temperature dependences of the true fracture stress (1, 3), ultimate strength (2, 4), and yield strength (5, 6) in helium (10 MPa) (1, 3, 5) and hydrogen (35 MPa) (2, 4, 6) at a tension rate of 1 mm/min.

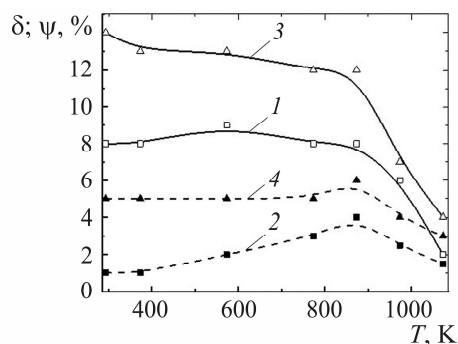


Рис. 7. Fig. 7.

Рис. 7. Температурні залежності відносного видовження (1, 2) і поперечного звуження (3, 4) у гелії (10 МПа) (1, 3) та водні (35 МПа) (2, 4) за швидкості розтягу 1 мм/мін.

Fig. 7. Temperature dependence of relative elongation (1, 2) and lateral reduction in area (3, 4) in helium (10 MPa) (1, 3) and hydrogen (35 MPa) (2, 4) at a tension rate of 1 mm/min.

Локалізація на поверхні зразка максимальних напружень і концентрацій водню за навантаження малоцикловим згином призводить до дуже суттєвого його впливу на довговічність металевих конструкційних матеріалів [23, 26, 31]. Кількість циклів до руйнування зразків за кімнатної температури і тиску водню 35 МПа знижується майже у 19 та 15 разів за амплітуд 0,8 і 1,6%, відповідно (таблиця; рис. 8). Із підвищенням температури дія водню послаблюється, однак при 1073 К малоциклова довговічність у водні на 20% нижча, ніж у гелії (рис. 8).

Рис. 8. Температурні залежності кількості циклів до руйнування у гелії (10 МПа) (1, 3) та водні (35 МПа) (2, 4) і коефіцієнта впливу водню на малоциклову довговічність (5, 6) за амплітуди згину 0,8 (1, 2, 6) і 1,6% (2, 4, 5).

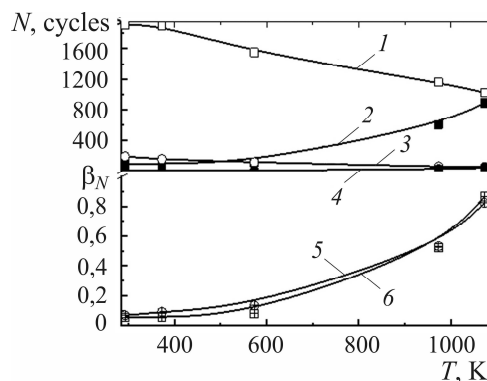


Fig. 8. Temperature dependences of the number of cycles to failure in helium (10 МПа) (1, 3) and hydrogen (35 МПа) (2, 4) and the coefficient of hydrogen influence on low-cycle fatigue life (5, 6) at bending amplitudes of 0.8 (1, 2, 6) and 1.6% (2, 4, 5).

Отже, сплав ХН60КМЮБВТФ за випробувань на короточасний розтяг і малоцикловий згин дуже чутливий до впливу наводнювального середовища. Це, насамперед, обумовлено мікроструктурою матеріалу, яка містить велику кількість інтерметалідів і карбідів та схильна до утворення крихкої пластинчастої σ -фази [27]. Виділення під час термічної обробки або експлуатації F- та σ -фаз є основною причиною крихкого руйнування матеріалів дисків та лопаток ГТУ, особливо у присутності водню [8–10, 22, 27–32].

ВИСНОВКИ

Міцність і пластичність зразків зі сплаву ХН60КМЮБВТФ зменшуються зі зростанням тиску водню від 0 до 65 МПа, зниженням швидкості короточасного розтягу у водні від 100 до 0,1 mm/min, а вплив водню на малоциклову довговічність зростає зі зменшенням амплітуди навантаження від 1,6 до 0,8%. За максимального окрихчення, яке досягається при поєднанні швидкості розтягу 0,1 mm/min і тиску водню 35 МПа або швидкості 1 mm/min і тиску водню 65 МПа, границя міцності та істинне напруження розриву гладких зразків зменшуються у 1,5 раза, границя міцності зразків із концентратором напружень – більш ніж удвічі, а пластичність зразків знижується до нуля. З підвищенням температури вплив водню зменшується, однак залишається відчутним до 1073 К.

Дослідження підтримано Міністерством науки і освіти України (договір № М/34-2023 (2101/10) та Польським національним агентством з питань академічного обміну (NAVA) (номер гранту BPN/BUA/2021/1/00003/U00001).

1. Nasir A., Mohammed A., and Jiy J. Y. Gas turbine engine: design, application and performance analysis // Transactions on Engineering Technologies (World Congr. of Eng., 2018). – Springer Nature Singapore Pte Ltd., 2019. – P. 115–126.
https://doi.org/10.1007/978-981-32-9531-5_9

2. Pokrovskij V. V., Ezhov V. N., and Sidyachenko V. G. Peculiarities of creep crack propagation in high-temperature nickel alloys under static loading // Problemy Prochnosti. – 2001. – № 5. – P. 52–64.
3. Development of a new fatigue and creep resistant PM nickel-base superalloy for disk applications / J.-Y. Guédou, I. Augustins-Lecallier, L. Nazé, P. Caron, and D. Locq // Super-alloys. – 2008. – P. 21–30. https://doi.org/10.7449/2008/Superalloys_2008_21_30
4. Glotka A. A. and Gaiduk S. V. Distribution of alloying elements in the structure of heat-resistant nickel alloys in secondary carbides // J. of Appl. Spectroscopy. – 2020. – **87**, № 5. – P. 812–81.
5. Furrer D. and Fecht H. Ni-based superalloys for turbine discs // JOM. – 1999. – **51**. – P. 14–17. <https://doi.org/10.1007/s11837-999-0005-y>
6. High-temperature salt corrosion of a heat-resistant nickel alloy / Y. H. Kvasnytska, L. M. Ivaskevych, O. I. Balytskyi, I. I. Maksyuta, and H. P. Myalnitsa // Materials Science. – 2020. – **56**, № 3. – P. 432–440. <https://doi.org/10.1007/s11003-020-00447-5>
7. Influence of γ' precipitate size and distribution on LCF behavior of a PM disk superalloy / G. Boittin, D. Locq, A. Rafray, P. Caron, P. Kanouté, F. Gallerneau, and G. Cailletaud // Superalloys. – 2012. – P. 167–176. <https://doi.org/10.1002/9781118516430.ch19>
8. Structural and phase transformations in single-crystal rhenium- and ruthenium-alloyed nickel alloy under testing for long-term strength / V. P. Kuznetsov, V. P. Lesnikov, I. P. Konakova, N. A. Popov, and Y. G. Kvasnitskaya // Metal Science and Heat Treatment. – 2015. – **57**, № 7–8. – P. 503–506. <https://doi.org/10.1007/s11041-015-9912-4>
9. Glotka A. A., Haiduk S. V., and Ol'shanetskii V. Y. Modeling thermophysical characteristics of nickel-based superalloys // J. of Eng. Physics and Thermophysics. – 2021. – **94**, № 5. – P. 1363–1368.
10. Hlotka A. A. and Haiduk S. V. Prediction of the thermodynamic processes of phase separation in single-crystal refractory alloys based on nickel // Materials Science. – 2020. – **55**, № 6. – P. 878–883. <https://doi.org/10.1007/s11003-020-00382-5>
11. Hazarabedian M. S. and Iannuzzi M. The role of nano-sized intergranular phases on nickel alloy 725 brittle failure // npj Mater Degrad. – 2021. – **5**. – Article number 39. <https://doi.org/10.1038/s41529-021-00185-2>
12. Hydrogen cooling of turbo aggregates and the problem of rotor shafts materials degradation evaluation / A. I. Balitskii, A. M. Syrotyuk, M. R. Havrilyuk, V. O. Balitska, V. O. Kolesnikov, and L. M. Ivaskevych // Energies. – 2023. – **16**. – Article number 7851. <https://doi.org/10.3390/en16237851>
13. Griebel P. Gas Turbines and Hydrogen // Hydrogen Science and Engineering: Materials, Processes, Systems and Technology. – 2016. – Chapter 43. – P. 1011–1032. <https://doi.org/10.1002/9783527674268.ch43>
14. Materials challenges in hydrogen-fuelled gas turbines / E. Stefan, B. Talic, Y. Larring, A. Gruber, and T. A. Peters // Int. Mater. Reviews. – 2022. – **67**, № 5. – P. 461–486. <https://doi.org/10.1080/09506608.2021.1981706>
15. Bancalari E., Chan P., and Diakunchak I. S. Advances hydrogen turbine development // Proc. of 24th Annual Int. Pittsburgh Coal. Conf. – University of Pittsburgh, 2007. – P. 1–16.
16. Gangloff R. P. and Somerday B. P. Gaseous hydrogen embrittlement of materials in energy technologies: The problem, its characterisation and effects on particular alloy classes. – Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2012. – **1**, **2**. – 864 p.
17. Lee A. Hydrogen embrittlement of nickel, cobalt and iron-based superalloys // Gaseous hydrogen embrittlement of materials in energy Technologies, 1: The problem, its characterization and effects on particular alloy classes. – Oxford–Cambridge–Philadelphia–New Delhi: Woodhead Publishing Limited, 2012. – P. 624–667.
18. Fishgoit A. V. and Kolachev B. A. Strength tests in hydrogen in the aerospace industry // Materials Science. – 1997. – **33**, № 4. – P. 568–573. <https://doi.org/10.1007/BF02537555>
19. Lu X., Ma Y., and Wang D. On the hydrogen embrittlement behavior of nickel-based alloys: Alloys 718 and 725 // Mater. Sci. Eng. A. – 2020. – **792**. – Article number 139785. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139785>
20. Influence of high pressure and high temperature hydrogen on fracture toughness of Ni-containing steels and alloys / A. I. Balitskii, L. M. Ivaskevich, V. M. Mochulskyi, J. Eliaz, and O. Skolozdra // Arch. of Mech. Eng. – 2014. – **LXI**, № 1. – P. 129–138. <https://doi.org/10.2478/meceng-2014-0007>

21. *In-situ* observation of hydrogen induced crack initiation in a nickel-based superalloy / Z. Zhang, G. Obasi, R. Morana, and M. Preuss // Scripta Materialia. – 2017. – **140**. – P. 40–44. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2017.07.006>
22. *Unravelling* the effect of F phase on hydrogen-assisted intergranular cracking in nickel-based Alloy 725: Experimental and DFT study / X. Lu, Y. Ma, Y. Ma, D. Wang, L. Gao, W. Song, L. Qiao, and R. Johnsen // Corrosion Science. – 2023. – **225**. – Article number 111569. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2023.111569>
23. Balitskii A. and Ivaskevich L. Hydrogen effect on cumulation of failure, mechanical properties, and fracture toughness of Ni-Cr alloys // Adv. in Mater. Sci. and Eng. – 2019. – Article number 3680253. <https://doi.org/10.1155/2019/3680253>
24. Balitskii A. and Ivaskevich L. Effect of alloying and heat treatment on embrittlement of Fe–Cr–Ni alloys in high-pressure hydrogen // Strength of Mater. – 2023. – **55**, № 1. – P. 79–89. <https://doi.org/10.1007/s11223-023-00504-9>
25. *Hydrogen* assisted intergranular cracking of alloy 725: the effect of boron and copper alloying / I. Taji, T. Hajilou, A. Ebner, D. Scheiber, S. Karimi, E. Plesiutchnig, W. Ecker, A. Barnoush, V. Maier-Kiener, R. Johnsen, and V. I. Razumovskiy // Corrosion Science. – 2022. – **203**. – Article number 110331. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2022.110331>
26. Balitskii A. and Ivaskevich L. Load rate-related mechanical properties of steels and alloys under static and cyclic loading in gaseous hydrogen // Strength of Mater. – 2021. – **53**, № 3. – P. 430–439. <https://doi.org/10.1007/s11223-021-00303-0>
27. Morozova G. I. Compensation of imbalance of alloying of refractory nickel alloys // Metal Science and Heat Treatment. – 2013. – **54**, № 11–12. – P. 667–671. <https://doi.org/10.1007/s11041-013-9568-x>
28. Moshtaghi M., Safyari M., and Mori G. Combined thermal desorption spectroscopy, hydrogen visualization, HRTEM and EBSD investigation of a Ni–Fe–Cr alloy: The role of hydrogen trapping behavior in hydrogen-assisted fracture // Mater. Sci. & Eng. A. – 2022. – **848**. – Article number 143428. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.143428>
29. *Corrosion* and hydrogen resistance of heatproof blade nickel-cobalt alloys / O. I. Balyts'kyi, Yu. H. Kvasnytska, L. M. Ivaskevych, and H. P. Mialnitsa // Materials Science. – 2018. – **54**, № 2. – P. 289–294. <https://doi.org/10.1007/s11003-018-0178-z>
30. Tkachev V. I., Ivaskevich L. M., and Levina I. M. Distinctive features of hydrogen degradation of heat-resistant alloys based on nickel // Materials Science. – 1997. – **33**, № 4. – P. 524–531. <https://doi.org/10.1007/BF02537549>
31. *Assessment* of mechanical properties and phase-structural state in corrosion-resistant steels under static and low-cycle loading / V. I. Vitvitskii, V. I. Tkachev, M. F. Berezhnitskaya, and R. V. Chepil // Strength of Mater. – 2007. – **39**, № 5. – P. 466–474. <https://doi.org/10.1007/s11223-007-0052-y>
32. *The combined* effects of hydrogen and aging condition on the deformation and fracture behavior of a precipitation-hardened nickel-base superalloy / Z. D. Harris, J. J. Bhattacharyya, J. A. Ronevich, S. R. Agnew, and J. T. Burns // Acta Mater. – 2020. – **186**. – P. 616–630. [doi:10.1016/j.actamat.2020.01.033](https://doi.org/10.1016/j.actamat.2020.01.033)

Одержано 02.11.2023