

УДК 539.4: 669.788

ВПЛИВ ТЕМПЕРАТУРИ ТА ЦИКЛІЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА ВОДНЕВЕ ОКРИХЧЕННЯ НІКЕЛЕВИХ ЖАРОМІЦНИХ СПЛАВІВ

Л. М. ІВАСЬКЕВИЧ

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

У діапазоні температур 293...1073 К досліджено вплив водню на механічні властивості вихідних та попередньо деформованих (циклічний згин із амплітудою 1,6% та частотою 0,5 Hz у гелії та водні під тиском 35 МПа) зразків із сплавів ХН55МБЮ і ХН56МБЮД. Кількість циклів до руйнування за малоциклового згину плоских зразків та відносне видовження циліндричних зразків найчутливіші до дії водню (зменшуються відповідно на 95...98 і 80...90% від значень у гелії). Зниження міцності та пластичності сплаву ХН55МБЮ максимальне за кімнатної температури, мінімальне за 873...973 К і знову суттєве при 1073 К. Виявлено позитивний вплив попереднього циклічного деформування у водні на границю короточасної міцності та пластичності обох сплавів у водні. За кімнатної температури відносне видовження зразків зі сплаву ХН55МБЮ зростає від 10 (недеформовані зразки) до 29% (деформовані на 20% від границі малоциклової довговічності).

Ключові слова: *короточасна міцність та пластичність, малоциклова довговічність, жароміцні нікелеві сплави, воднева деградація.*

Із розвитком техніки все частіше використовують машини та апарати із обмеженим терміном експлуатації, що обумовлено зниженням їх металоємності та інтенсифікацією робочих параметрів. У таких конструкціях можливі напруження, які перевищують границю текучості матеріалу, тобто він багатократно пластично (малоциклово) деформується. Врахування впливу змінних пружно-пластичних навантажень, високих температур і агресивних газових середовищ на механічні властивості матеріалів необхідне, щоб гарантувати надійність роботи конструктивних елементів в енергетичній та авіакосмічній галузях. Особливо важливо оцінити рівень водневого окрихчення, яке часто призводить до катастрофічного руйнування виробів [1–7].

Нижче вивчено закономірності водневого окрихчення сплавів ХН55МБЮ та ХН56МБЮД за короточасного статичного та циклічного навантажень при 293...1073 К і впливу малоциклового навантаження у водні на міцність та пластичність.

Матеріали та методика випробувань. Досліджувані сплави – дисперсійно тверді жароміцні із основною інтерметалідною зміцнювальною γ' -фазою типу $Ni_3(Al, Nb, Ti)$. Завдяки високій міцності та пластичності у широкому інтервалі температур їх використовують для виготовлення лопаток, дисків та інших деталей газових турбін [2, 6]. Хімічний склад сплавів та механічні властивості, визначені на циліндричних і плоских зразках у гелії та водні за тиску 35 МПа, наведено у таблиці.

Після гартування та ступінчастого старіння [6] розмір зерна в обох сплавах становив 40...60 μm , вміст інтерметалідів 7...8% (ХН55МБЮ) і 15...17% (ХН56МБЮД), а їх розміри 320...500 А. При 293...1073 К у гелії та водні за швидкості рухомого

захвата 0,1 mm/min визначали механічні властивості стандартних п'ятикратних циліндричних шліфованих зразків із діаметром робочої частини 5 mm.

Шліфовані плоскі зразки із розмірами робочої частини 3×6×20 mm навантажували у гелії та водні під тиском 35 МПа жорстким чистим згином із частотою 0,5 Hz та максимальною амплітудою деформації зовнішніх волокон 1,6% до кількості циклів, рівної 20; 40; 60 та 80% від межі малоциклової довговічності за 293 і 823 К. Після цього їх розтягували до руйнування і визначали границю текучості $\sigma_{0,2}$, короткочасну міцність σ_B , відносні видовження δ і поперечне звуження ψ .

Робочі камери установок для випробувань у водні заздалегідь вакуумували, продували воднем, знову вакуумували і заповнювали воднем до заданого тиску. За високих температур зразки витримували 30 min для встановлення теплової рівноваги. Чутливість сталі до водневої деградації оцінювали за коефіцієнтом β , який визначали як співвідношення значень відповідних характеристик у водні та гелії (наприклад, коефіцієнт впливу водню на малоциклову довговічність $\beta_N = N_H/N_{He}$).

Хімічний склад та механічні властивості циліндричних та плоских зразків із нікелевих сплавів у гелії (чисельник) та водні (знаменник) за 293 К

| Хімічний склад, mass.% | Форма зразка | Механічні властивості | | | | |
|---|-------------------|-----------------------|-------------------|-----------------|-----------------|--|
| | | σ_B | $\sigma_{0,2}$ | δ | ψ | Кількість циклів N до руйнування, $\varepsilon = 1,6\%$ |
| | | МПа | | % | | |
| ХН55МБЮ: 0,05С; 0,23Si; 19,0Cr; 8,87 Мо; 1,73Nb; 1,49 Al; 12,0 Fe; 0,02 Cu | Цилін- дричний | <u>1080</u> 970 | <u>650</u> 660 | <u>35</u> 7 | <u>38</u> 21 | |
| | Плоский | <u>1050</u> 980 | <u>630</u> 630 | <u>38</u> 10 | <u>34</u> 11 | |
| ХН56МБЮД: 0,04С; 0,12Si; 16,4Cr; 5,24Мо; 0,35V; 5,19 Nb; 0,58Ti; 1,0Al; 15,14 Fe; 0,49Cu | Цилін- дричний | <u>1320</u> 880 | <u>840</u> 750 | <u>34</u> 4 | <u>48</u> 12 | |
| | Плоский | <u>1310</u> 910 | <u>850</u> 780 | <u>33</u> 6 | <u>48</u> 13 | |

Температурні залежності механічних властивостей досліджених матеріалів у гелії типові для жароміцних нікелевих сплавів [6]. Однак виявили деякі відмінності у характері зміни міцності, пластичності та малоциклової довговічності з ростом температури та під дією водню, які обумовлені різним хімічним складом та кількістю виділень зміцнювальних фаз.

Сплав ХН55МБЮ. Його міцність у гелії з ростом температури до 773 К змінюється несуттєво, а за вищих температур різко зменшується (рис. 1, крива 3). Цей процес супроводжується зниженням пластичності при 873...973 К і збільшенням відносного видовження зразків при 1073 К (крива 5). Відомо [8], що провали пластичності у температурному діапазоні інтенсивних фазових перетворень обумовлені локалізацією деформації на межах зерен через інтенсивний перерозподіл у примезових областях нікелю, ніобію, титану та алюмінію, а деяке її підвищення за вищих температур – частковою коагуляцією зміцнювальних фаз і можливим розчиненням невеликої кількості дрібнодисперсних виділень. Малоциклова довговічність у гелії стабільна в інтервалі 293...473 К і різко знижується за вищих температур (рис. 2, крива 3).

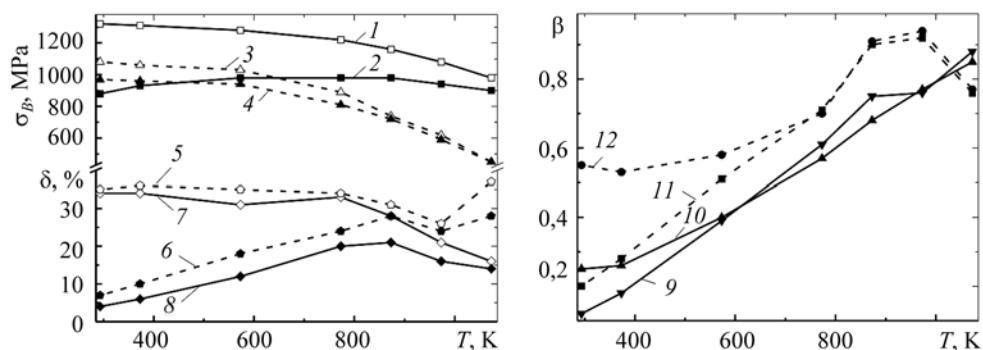


Рис. 1. Температурні залежності границі міцності σ_B (1–4), відносного видовження δ (5–8) та коефіцієнта впливу водню β на відносні видовження (9, 11) та поперечне звуження (10, 12) циліндричних зразків із сплавів ХН56МБЮД (1, 2, 7–10) та ХН55МБЮ (3–6, 11, 12) у гелії (1, 3, 5, 7) і водні (2, 4, 6, 8) під тиском 35 МПа.

Fig. 1. Temperature dependences of ultimate strength, σ_B , (1–4), elongation, δ , (5–8) and coefficients of hydrogen influence, β , on relative elongation (9, 11) and lateral contraction (10, 12) of cylindrical ХН56МБЮД (1, 2, 7–10) and ХН55МБЮ (3–6, 11, 12) alloy specimens in helium (1, 3, 5, 7) and hydrogen (2, 4, 6, 8) under the pressure of 35 МПа.

У водні параметр σ_B зразків зменшується незначно (рис. 1, криві 3, 4). Обумовлене воднем погіршення характеристик δ і ψ (див. таблицю і рис. 1) і малоциклової довговічності N (рис. 2) максимальне за кімнатної температури. На відміну від дисперсійно твердких аустенітних сталей [4, 5, 7] відносне видовження зразків δ чутливіше до дії водню, ніж поперечне звуження ψ (рис. 1, криві 11, 12), причому циліндричні зразки окрихчуться дещо сильніше, ніж плоскі (див. таблицю). З підвищенням температури від 773 до 973 К вплив водню на відносні видовження і поперечне звуження, а також на кількість циклів до руйнування зразків із сплаву ХН55МБЮ слабшає і знову посилюється при 1073 К (рис. 1, криві 5, 6, 11, 12; рис. 2, криві 3–5). Очевидно, обумовлені воднем процеси локалізації деформації і руйнування, головно зернограничного, у цьому сплаві при 1073 К настільки інтенсивні, що коагуляція зміцнювальних фаз недостатня високотемпературної пластифікації (рис. 1, криві 5, 6). Аналогічний високотемпературний максимум водневої деградації виявлений раніше для дисперсійно твердої аустенітної сталі 05X11H23T3MP [4].

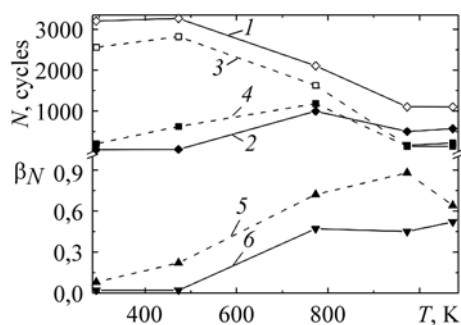


Рис. 2. Температурні залежності кількості циклів до руйнування N (1–4) ($\epsilon = 1,6\%$) та коефіцієнта впливу водню на малоцикловою довговічність β_N (5, 6) плоских зразків із сплавів ХН56МБЮД (1, 2, 6) і ХН55МБЮ (3–5): 1, 3 – гелій; 2, 4 – водень під тиском 35 МПа.

Fig. 2. Temperature dependences of a number cycles to failure, N , (1–4) ($\epsilon = 1.6\%$) and coefficient of hydrogen influence on low-cycle durability, β_N , (5, 6) of plane ХН56МБЮД (1, 2, 6) and ХН55МБЮ (3–5) alloy specimens: 1, 3 – helium; 2, 4 – hydrogen under the pressure of 35 МПа.

Сплав ХН56МБЮД. Вміст зміцнювальної γ' -фази вдвічі більший, ніж у сплаві ХН55МБЮ, тому за всіх температур він міцніший (рис. 1, криві 1, 3), при цьо-

му через дисперсність та гомогенність інтерметалідів його відносно поперечне звуження та малоциклова довговічність вищі (див. таблицю; рис. 2, криві 1, 3). Сплав більш легований важкоплавкими металами, які сповільнюють дифузійні процеси, тому зниження міцності у гелії з ростом температури незначне (рис. 1, криві 1, 2), а температура пластифікації, імовірно, перевищує 1073 К (криві 7, 8). Він значно чутливіший до водневої деградації, причому у водні суттєво знижуються не лише пластичність та малоциклова довговічність (криві 7–10), а й міцність гладких зразків (криві 1, 2). За 293 К границя міцності зменшується від 1310 до 910 МПа і стає нижчою, ніж менш міцного у гелії сплаву ХН55МБЮ (див. таблицю).

З ростом температури від 293 до 1073 К водневе окрихчення сплаву послаблюється, однак суттєвий вплив водню на механічні властивості зберігається у всьому температурному діапазоні (рис. 1, криві 9, 10; рис. 2, криві 1, 2, 6). Зокрема, при 1073 К малоциклова довговічність зразків знижується вдвічі (рис. 2, криві 1, 2, 6).

Вплив малоциклового деформування на міцність та пластичність. Дослідження змін міцності та пластичності сталей за малоциклового навантаження у нейтральному середовищі виявили, що втома охоплює три стадії: зміцнення зі зниженням пластичності (до 10...20% від границі довговічності), стабілізації властивостей (до 40...60%) та інтенсивного погіршення всіх механічних характеристик (понад 60%) [9]. Сплави зміцнені після старіння під час термічної обробки, тому підвищення границі міцності та зменшення відносного видовження внаслідок циклічного деформування при 293 і 873 К у гелії на 20% від границі довговічності незначне (рис. 3, криві 1, 3, 5). За обох температур міцність зразків зі сплаву ХН55МБЮ відчутно знижується після досягнення 60% циклів від границі малоциклової довговічності (рис. 3а, с), а сплаву ХН56МБЮД порівняно слабо змінюється за малоциклового деформування (рис. 3б, д).

Іншу закономірність виявили під час випробувань у водні: після циклічного згину невелике збільшення границі текучості та короткочасної міцності зразків на першій стадії (рис. 3, криві 1–4) супроводжується підвищенням пластичності у водні: суттєвим за кімнатної температури (рис. 3а, б, криві 5, 6) і дещо меншим за 873 К, коли сплави порівняно слабо окрихчуються як у вихідному, так і у попередньо деформованому стані (рис. 3с, д). Зокрема, при 293 К після деформування на 20% від границі малоциклової довговічності відносне видовження зразків із сплаву ХН55МБЮ у водні становить 29%, тобто майже втричі вище, ніж недеформованих. Позитивний вплив циклічного навантаження у водні на міцність та пластичність сплаву ХН56МБЮД у цьому ж середовищі дещо слабший, але теж досить відчутний (рис. 3б, д).

Значне поліпшення механічних властивостей у водні на першій стадії малоциклової втоми можна пов'язати із формуванням під навантаженням полігональної дислокаційної субструктури [9], характерної для матеріалів із високою енергією дефектів упакування, до яких відносяться досліджені сплави. Така дислокаційна структура сприяє рівномірному розподілу напружень та водню, перешкоджає його транспортуванню та накопиченню на межах зерен з подальшим міжзеренним руйнуванням, яке є ознакою водневої деградації мартенситних і дисперсійно твердких аустенітних сталей та нікелевих сплавів [3, 4, 7, 10, 11].

Встановлено, що полігонізація дислокаційної субструктури і рівномірний розподіл зміцнювальних інтерметалідних фаз механічною або термомеханічною обробками у нейтральному середовищі зменшують чутливість аустенітних сталей до водню [4, 10, 11]. Оптимальними є розтяг на 15...20% при 773 К хромо-марганцевонікелевих сталей [10] і попередній розтяг дисперсійно твердої сталі на 10% за кімнатної температури із подальшим старінням при 923 К впродовж 16 h

[11]. Характеристики пластичності δ і ψ сталей у водні після термомеханічних обробок зростають у 1,5–2 рази, при цьому характер руйнування змінюється від міжзеренного (термічна обробка) до переважно ямкового із окремими міжзеренними тріщинами (термомеханічна обробка) [10, 11]. Позитивний вплив попереднього циклічного навантаження у водні на опір водневу окрихненню за короткочасного статичного розтягу максимальний у діапазоні 20...40% від кількості циклів до руйнування за малоциклового навантаження (рис. 3), коли досягається висока густина дислокацій у стінках комірок та зменшуються їх розміри [9].

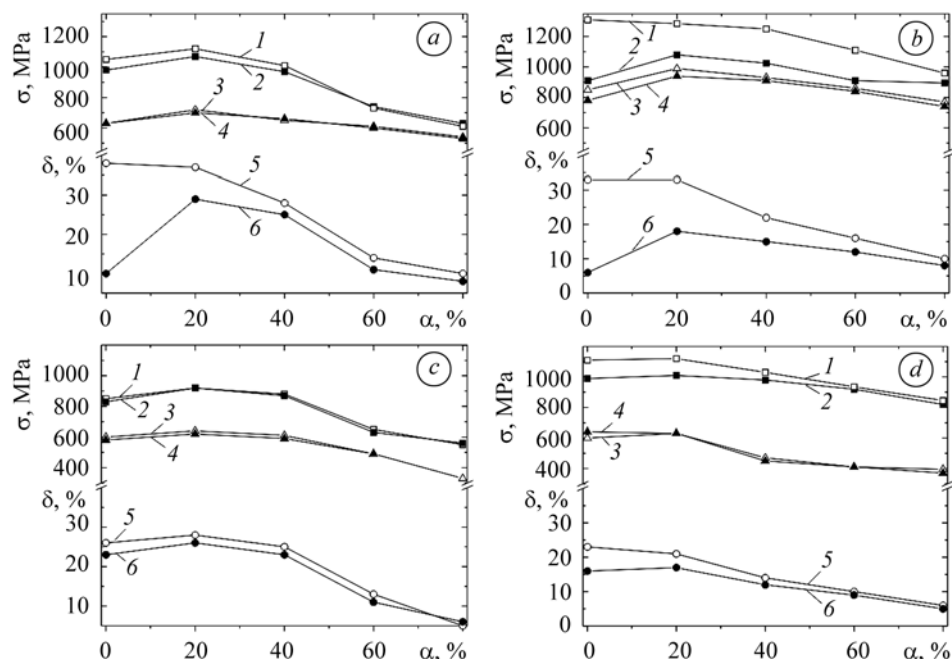


Рис. 3. Вплив попереднього циклічного навантаження α (відсоток від малоциклової довговічності) на границю короткочасної міцності σ_B (1, 2), границю текучості $\sigma_{0,2}$ (3, 4) та відносне видовження δ (5, 6) плоских зразків із сплавів ХН55МБЮ (а, с) і ХН56МБЮД (b, d) при 293 (а, b) та 873 К (с, d): 1, 3, 5 – гелій; 2, 4, 6 – водень під тиском 35 МПа.

Fig. 3. The influence of preliminary low-cycle loading, α , (percent of low-cycle durability) on ultimate strength, σ_B , (1, 2), yield strength, $\sigma_{0,2}$, (3, 4) and elongation, δ , (5, 6) of plane XH55MBЮ (a, c) and XH56MBЮД (b, d) alloy specimens at 293 (a, b) and 873 K (c, d): 1, 3, 5 – helium; 2, 4, 6 – hydrogen under the pressure of 35 MPa.

ВИСНОВКИ

Вплив водню на механічні властивості сплавів ХН55МБЮ та ХН56МБЮД проявляється у значному зниженні пластичності та малоциклової довговічності. Особливо чутливе до водневої деградації відносне видовження δ , яке при 293 К зменшується у водні під тиском 35 МПа у 5 та 8,5 разів відповідно. З ростом температури від 293 до 973 К ступінь водневого окрихнення сплавів зменшується, а з підвищенням до 1073 К вплив водню на пластичність сплаву ХН55МБЮ інтенсифікується. Циклічне деформування зразків у водні за кількості циклів, рівні 20...40% від границі малоциклової довговічності, призводить до підвищення їх міцності та два–трикратного збільшення відносного видовження за кімнатної температури.

РЕЗЮМЕ. В диапазоне температур 293...1073 К исследовано влияние водорода давлением 35 МПа на механические свойства исходных и предварительно деформированных

образцов из сплавов ХН55МБЮ и ХН56МБЮД. Количество циклов до разрушения при малоцикловом изгибе плоских образцов и относительное удлинение при кратковременном растяжении цилиндрических образцов наиболее чувствительны к водородному воздействию (уменьшаются на 95...98 и 80...90% от значений в гелии соответственно). Снижение прочности и пластичности сплава ХН55МБЮ в водороде максимально при комнатной температуре, минимально при 873...973 К и существенно при 1073 К. Выявлено положительное влияние предварительного циклического деформирования в водороде на предел кратковременной прочности и пластичность обоих сплавов в водороде.

SUMMARY. The effect of gaseous hydrogen under the pressure of 35 MPa on the mechanical properties of non-deformed and deformed ХН55МБЮ and ХН56МБЮД alloy specimens in the temperature range of 293...1073 K has been investigated. The number of cycles to failure under short-term bending of plane specimens and relative elongation of cylindrical specimens under short-term tension are the most sensitive to hydrogen action (decrease by 95...98 and 80...90% of the value in helium). The effect of hydrogen on the mechanical properties of ХН55МБЮ alloys is maximum at room temperature, minimum at 873...973 K, and again more significant at 1073 K. The positive influence of preliminary low-cycle loading in hydrogen on ultimate strength and plasticity of both alloys in hydrogen are established.

1. *Balitskii A. I. and Panasyuk V. V.* Workability Assessment of Structural Steels of Power Plant Units in Hydrogen Environments // Проблемы прочности. – 2009. – № 1. – P. 69–75.
2. *Расчет* элементов конструкций водородной энергетики на прочность / А. И. Белогуров, В. С. Радчук, М. А. Рудис и др. // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2004. – **40**, № 6. – С. 89–94.
(*Belogurov A. I., Rachuk V. S., Rudis M. A., Sushkov A. M., and Kholodnyi V. I.*, Strength Analysis of Structural Elements of Hydrogen Power-Generating Equipment // Materials Science. – 2004. – **40**, № 6. – P. 814–821.)
3. *Колачев Б. А.* Водородная хрупкость металлов. – М.: Металлургия, 1985. – 217 с.
4. *Balitskii O. I., Ivaskevich L. M., and Mochulskiy V. M.* Temperature Dependences of Age-Hardening Austenitic Steels Mechanical Properties in Gaseous Hydrogen / Ed. M. Elboujdaini // Proc. on CD ROM of the 12th Int. Conf. on Fracture, Ottawa, Canada, July 12–17, 2009). – Ottawa: NRC, 2009. – Paper No T19.001. – 7 p.
5. *Фишгойт А. В. Колачев Б. А.* Випробування на міцність у водні в аерокосмічній промисловості // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 1997. – **33**, № 4. – С. 151–154.
(*Fishgoit A. V. and Kolachev B. A.*, Strength Tests in Hydrogen in the Aerospace Industry // Materials Science. – 1997. – **33**, № 4. – P. 568–573.)
6. *Химушин Ф. Ф.* Жаропрочные стали и сплавы. – М.: Металлургия, 1978. – 860с.
7. *Томпсон А. У., Бернстейн И. М.* Роль металлургических факторов в процессах разрушения с участием водорода // Достижения науки о коррозии и технологии защиты от нее. Коррозионное растрескивание / Пер. с англ. – М.: Металлургия, 1985. – С. 47–149.
8. *Ткачов В. І., Іваськевич Л. М., Мочульський В. М.* Температурні залежності механічних властивостей аустенітних та мартенситних сталей у водні // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2007. – **43**, № 5. – С. 53–64.
(*Tkachov V. I., Ivas'kevych L. M., and Mochul's'kyi V. M.* Temperature Dependences of the Mechanical Properties of Austenitic and Martensitic Steels in Hydrogen // Materials Science. – 2007. – **43**, № 5. – P. 654–666.)
9. *Савчин Б. М.* Исследование закономерностей изменения структуры и физико-механических свойств нержавеющей аустенитных сталей в процессе малоцикловых нагружений: Автореф. дис... канд. техн. наук. – Львов, 1979. – 21 с.
10. *Ткачов В. І., Іваськевич Л. М.* Механічні властивості хромомарганцевих аустенітних сталей у середовищі водню // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 1999. – **35**, № 5. – С. 75–78.
(*Tkachov V. I. and Ivas'kevych L. M.*, Mechanical Properties of Chromium-Manganese Austenite Steels in a Hydrogen Environment // Materials Science. – 1999. – **35**, № 5. – P. 684–688.)
11. *Ткачѳв В. ІІ., Іваськевич Л. М.* Способ повышения сопротивления водородному охрупчиванию дисперсионно-твердеющих железоникелевых сплавов // Тяжелое машиностроение. – 2007. – № 4. – С. 37–39.

Одержано 05.05.2010