

УДК 620.197:669.788

ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНА ВОДНЕТРИВКІСТЬ МАРТЕНСИТНИХ СТАЛЕЙ

О. Балицький

Професор, д-р техн.наук

В. Мочульський

Інженер

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

А ³годоаае³ оаі іадаоо³ 293...723Е, оаеаеі³ ааоіоі оааііу 1 і і /оа са ое³а
аіаір аі 35 І і а аесіа-ае³ оадаоадеп³о³ еіоіоі-аііі; і ³оіі³ і аеіо³еіаі;
аіааіа³-іі³ ³оаеае іадао³аііаі ееа³о 15О12І 2І ОАА (АІ -517) оа
13О11І 2А2І О (А²-961). Апоаі іаеаіі, іі о аасіііа³аіі о аіаі³ са оаі іадаоо³
293 ³ 373Е ³ноіоіі сіеао³оіу іеа³о³-і³ноу с³а³е³а, е³еі³ноу ое³е³а аі оеі оааі іу
са і аеіо³еіаі; аоіі е іде а³аі оеіаіі о ³е³ноіі о с³а³е³ і еі³нео с³а³е³а. С³а³еі³оі іу
аі і³е³оае ааоіоі о³; іаааіоааі іу са ³оаеі; ³а³ноіоі ідеаіае³о аі іі³неаі іу а³;
аіаіааіаі ³адааіае³а а ³годоаае³ оаі іадаоо³ 293...483 Е оа іі³неааеаі іу са
оаі іадаоо³е 723 Е. Аіааіу і³аае³о³ ³о³еі³ноу ³оаеае аі і³а³с³а³аі ііаі оа
і ³а³с³а³аі ііаі оеі оааі іу, уеа іі³не³р³оіу с³а³еі³оі іу оадаоадеп³о³ і ³оіі³.

водневе окрихчення, короткотривала міцність, малоциклова втома, характер руйнування

Вичерпання й обмеженість запасів традиційних енергоносіїв (нафта, газ) викликав потребу в переході на нові енергоносії до яких, в першу чергу, належить водень, що стало поштовхом до розроблення конструкційних матеріалів водневої енергетики, які б забезпечували довготривалу й безпечну експлуатацію виробів цієї галузі. Крім цього, в останній час у нафтохімічній промисловості, аерокосмічному та енергетичному машинобудуванні [1, 2] збільшилась кількість обладнання яке працює за підвищених параметрів, тиску і температури водню, тому зросла потреба у таких матеріалах, які б мали високу водневостійкість у поєднанні з великим запасом міцності.

Не дивлячись на численні дослідження властивостей конструкційних матеріалів у водневому середовищі, чутливість сталей і сплавів до водневої деградації за підвищених температур досліджена недостатньо. Сьогодні немає однозначності в оцінці впливу газоподібного водню за підвищених температур на механічні властивості конструкційних матеріалів, тому ця проблема актуальна.

Мета статті — провести комплексні дослідження водневої деградації сталі 15X12H2MФАВ(ЕІ-517) і 13X11H2B2МФ(ЕІ-961) в інтервалі температур 293...723 К при дії газоподібного водню за випробувань на короткочасну міцність та малоциклову довговічність.

Характеристика матеріалу і методика випробувань. Механічні властивості сталей досліджували за короткочасного розтягу п'ятикратних циліндричних зразків з діаметром робочої частини 5 мм у спеціальній камері [3] за тисків водню до 35 МПа при швидкості деформації 1,0 мм/хв, встановлених на розривній машині УМЕ-10ТМ. Малоциклову витривалість за жорсткого чистого віднульового згину визначали на установці [3] за тисків до 35 МПа, амплітуд 0,8, 1,2, та 1,6 % і частоти навантаження 0,5 Гц на шліфованих плоских зразках з робочою частиною 3×6×20 мм.

Спеціальні вимоги. Потрібні тиски робочих газів у камері за всіх видів випробувань створювалися за допомогою установки УНГР-2000 з потужністю 18 л/год,

а вакуум — форвакуумним насосом потужністю не менше 5 л/год.

Чистота проведення експерименту у водні високого тиску припускає обов'язкове «промивання» робочої камери перед заповненням її воднем. «Промивання» включає такі послідовні операції: вакуумування камери до тиску $1,33 \times 10^{-2}$ Па; заповнення її воднем до тиску 2,9 МПа; випускання водню в атмосферу; вторинне вакуумування робочої камери до тиску $1,33 \times 10^{-2}$ Па; заповнення робочої камери до заданого тиску.

Середовище випробувань — очищений водень за ДСТ 3022-80 з початковим тиском $15 \pm 0,5$ МПа. Нагрів зразків до потрібної температури здійснювався за допомогою ніхромових електропечей опору після заповнення камери газоподібним воднем. Зразки витримували у заданому температурному режимі протягом 30 хв для встановлення теплової рівноваги.

Чугливість сталі до водневої деградації оцінювали за коефіцієнтом β , який визначали як відношення значень відповідних характеристик у водні та нейтральному середовищі (наприклад, коефіцієнт впливу водню на відносно поперечне звуження зразків $\beta_{\psi} = \psi_{\text{H}} / \psi_{\text{пов.}}$).

Середньоміцні сталі 15X12H2MФAB і 13X11H2B2MФ належать до класу мартенситних і експлуатуються у воднемістких середовищах в інтервалі температур 20...823 К. Мартенситні нержавіючі сталі 15X12H2MФAB і 13X11H2B2MФ відрізняються вмістом вуглецю, нікелю, хрому, молібдену, вольфраму (табл. 1) Визначальними відмінностями у хімічному складі

мартенситних сталей є добавка 0,25 % ніобію і 0,02 % азоту в сталі 15X12H2MФAB. Вміст у сталях сірки та фосфору не перевищує відповідно 0,005 і 0,03 %.

Після термічного оброблення (табл. 2) їхня структура складається з відпущеного мартенситу, невеликої кількості залишкового аустеніту, розташованого у вигляді прошарків між пластинами мартенситу і на межах колишніх аустенітних зерен та дрібнодисперсних легованих карбідів Me_{23}C_6 , (W, Nb)C.

Температури гартування в інтервалі 1283...1403 К та високий відпуск 953 К забезпечують в'язкий стан сталей і унеможливають утворення в мартенситі включень δ -фериту. Термічне оброблення сталі 15X12H2MФAB (ТО1) і 13X11H2B2MФ приводить до утворення неоднорідної структури, в якій зберігається смугастість аустеніту і грубі виділення сітки карбідів по межах зерен. Спеціальний режим гартування і подвійний відпуск сталі 15X12H2MФAB (ТО2) приводить до збільшення частки залишкового аустеніту, його стабільності, зменшення напружень у мартенситній складовій та зростання кількості карбідних виділень. Кількість залишкового аустеніту в сталях після гартування та відпуску залежить від вмісту вуглецю в сталі, температури аустенізації, швидкості охолодження, вмісту легувальних елементів та інших чинників. Відомо [4], що стабілізований дрібнодисперсний аустеніт у структурі нержавіючих малоуглецевих сталей сприяє підвищенню пластичності та ударної в'язкості, при його оптимальному вмісті в межах 10 — 25 %.

Таблиця 1

Хімічний склад досліджених сталей

| Матеріал | Вміст елементів, мас. % | | | | | | | | | |
|-------------|-------------------------|------|------|-----|------|------|------|------|------|------|
| | C | Si | Cr | Ni | Mo | W | V | Nb | Mn | N |
| 15X12H2MФAB | 0,15 | 0,50 | 12,2 | 1,9 | 1,52 | 0,72 | 0,18 | 0,25 | 0,5 | 0,02 |
| 13X11H2B2MФ | 0,13 | 0,60 | 11,5 | 1,6 | 0,45 | 1,93 | 0,24 | - | 0,63 | - |

Таблиця 2

Режими термічного оброблення та механічні властивості сталей у водні під тиском 35 МПа та в нейтральному середовищі за швидкості розтягу 1 мм/хв

| № п/п | Матеріал | Термічна обробка | | Умови випроб | σ_b , МПа | $\sigma_{0,2}$, МПа | δ , % | ψ , % |
|-------|--------------------|-------------------------------|---|--------------|------------------|----------------------|--------------|------------|
| | | Режим гартування | Режим відпуску | | | | | |
| 1 | 15X12H2MФAB ТО1 | 1393 К, 1 год., олива | 953 К, 2 год., повітря | 293 К, пов. | 1080 | 940 | 16 | 62 |
| | | | | 293 К, Н | 1060 | 950 | 7 | 18 |
| | | | | 723 К, вак. | 880 | 760 | 13 | 63 |
| | | | | 723 К, Н | 870 | 710 | 13 | 63 |
| 2 | 15X12H2MФAB ТО2 | 1403 К, 0,5 год., олива | 793 К, 1 год., 953К, 2 год., повітря | 293 К, пов. | 1110 | 965 | 14 | 56 |
| | | | | 293 К, Н | 1100 | 960 | 5 | 12 |
| | | | | 723 К, вак. | 900 | 770 | 10 | 59 |
| | | | | 723 К, Н | 890 | 750 | 10 | 55 |
| 3 | 13X11H2B2MФ | 1283 К, 1 год., олива | 953 К, 2 год., повітря | 293 К, пов. | 1010 | 880 | 17 | 59 |
| | | | | 293 К, Н | 1000 | 870 | 7 | 19 |
| | | | | 723 К, вак. | 780 | 720 | 13 | 65 |
| | | | | 723 К, Н | 750 | 700 | 13 | 62 |

Вплив водню на механічні властивості та характер руйнування сталі 15X12H2MФАВ і 13X11H2B2MФ за короткочасного статичного навантаження. Експериментально визначені механічні характеристики міцності й пластичності матеріалів за короткочасного статичного навантаження використовують для вибору матеріалів під час інженерних розрахунків на міцність елементів конструкцій. Для мартенситних сталей [1 — 3], до яких належать перелічені сталі, встановлено, що за певних, залежних від хімічного складу й структури, матеріалів, величин тиску водню, температури та швидкостей деформування досягається максимальний вплив водню на характеристики пластичності мартенситних сталей. Встановлення чутливості сталей 15X12H2MФАВ (ТО1, ТО2) і 13X11H2B2MФ до водневого окрихчення за короткочасового випробування проводили зі швидкістю навантаження 1 мм/хв. Дослідження поведінки сталей при розтягуванні в середовищі газоподібного водню показало (табл. 2) істотне погіршення характеристик пластичності (відносне видовження δ , відносне поперечне звуження ψ) та не вплинуло на міцність (межу міцності σ_b , межу пластичності $\sigma_{0,2}$).

За температури 293 К відносне видовження δ і відносне поперечне звуження ψ знижуються у водні порівняно з повітрям у 2 — 3 та 4 — 5 разів відповідно. З ростом температури від 293 до 723 К межа короткотривалої міцності σ_b мартенситних сталей 15X12H2MФАВ (ТО1 — рис. 1, крива 1; ТО2 — рис.1, крива 3), 13X11H2B2MФ (рис. 1, крива 5) у гелії монотонно зменшується.

Межа міцності σ_b у водні в інтервалі температур 293...723 К сталей 15X12H2MФАВ (ТО1 — рис. 1, крива 2; ТО2 — рис. 1, крива 4) і 13X11H2B2MФ (рис. 1, крива 6) теж монотонно зменшується. Пластичні властивості сталей при температурі випробувань 723 К не залежать від впливу газоподібного водню і практично не змінюються. Слід відмітити, що у водні напруження розриву σ_r

та пластичності $\sigma_{0,2}$ сталей все ж таки дещо нижчі, ніж в інертному середовищі (див. табл. 2, рис. 1). Коефіцієнт впливу водню під тиском 35 МПа на відносне поперечне звуження β_ψ для всіх досліджених сталей з підвищенням температури — зменшується (рис. 1), а при температурі 723 К шкідливий вплив на цю характеристику відсутній. При випробуваннях на короткотривалу міцність сталь 15X12H2MФАВ (ТО1) менш чутлива до дії водню, ніж сталі 15X12H2MФАВ (ТО2) і 13X11H2B2MФ, однак попри відмінності у хімічному складі, режимах термічного оброблення і, відповідно, у мікроструктурі та механічних властивостях сталей на повітрі (див. табл. 2), ступінь та закономірності впливу водню на характеристики міцності σ_b , $\sigma_{0,2}$, пластичності δ і ψ кількісно та якісно відрізняються неістотно.

За статичного короткотривалого розтягу на участку рівномірної деформації характер кривої у водні та на повітрі зразків сталей 15X12H2MФАВ (ТО1, ТО2) і 13X11H2B2MФ не змінюється.

Це свідчить про те, що водень рухається разом з дислокаціями й нагромаджується на розмножених дислокаціях і не впливає на процес зміцнення при рівномірній деформації. Зразки зі сталі 13X11H2B2MФ за статичного короткотривалого розтягу на повітрі руйнуються в'язко, після значної пластичної деформації за схемою «чашка — конус» (див. рис. 2,а,б) Тріщина виникає і розвивається в середній частині шийки зразка (див. рис. 2,а) через локалізацію деформації в обмеженому об'ємі шляхом утворення мікропор та їх злиття з утворенням центральної макротріщини і руйнуванням шляхом відриву.

Швидкість росту тріщини зростає та змінює свій напрям у стінках шийки зразка під дією поздовжніх напружень і, відповідно, дотичних, нахилених під кутом 45° до осі зразка. Внаслідок локалізації пластичної деформації в площинах дії дотичних напружень подальший ріст тріщини проходить під дією пластичного зсуву шляхом зрізу (див. рис. 2,б). Істотне зниження характеристик пластичності (δ, ψ) наводнених сталей у процесі зосередженої деформації зв'язано з утворенням тріщин на поверхні зразків та подальшим їх ростом. Мікроструктура зламу в серцевині зразка і в зоні поверхневої тріщини принципово різні (див. рис. 2,в,г).

Зародження тріщин та їх ріст у водневій атмосфері при пластичному деформуванні визначається зниженням поверхневої енергії через адсорбцію H_2 та проникнення в поверхневий шар у результаті рівноважної розчинності і втягуванням його дислокаціями з поверхні в області зосередженої деформації. Основною особливістю руйнування у водні за статичного розтягу є зустрічний рух двох тріщин: одна від серцевини до поверхні, інша під впливом водню рухається від поверхні до середини зразка. За статичного короткотривалого розтягу у водні за кімнатної температури зразки сталей руйнуються крихко шляхом утворення і коалесценції мікропор та за характерними елементами водневого руйнування мартенситного квазі-сколу з елементами міжзеренного руйнування. Локалізація пластичної деформації перед руйнуванням у водневому середовищі за кімнатної температури в центральній частині зразка призводить до в'язкого ямкового зламу не дивлячись на мінімальну в'язкість (див. рис. 2,в).

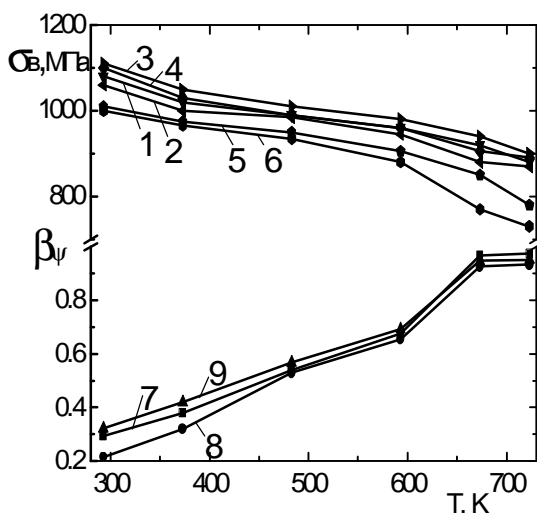


Рис. 1. Температурні залежності межі короткотривалої міцності σ_b (1 — 6) у гелії (1, 3, 5) та у водні під тиском 35 МПа (2, 4, 6) і коефіцієнта впливу водню на відносне поперечне звуження β_ψ зразків зі сталей 15X12H2MФАВ (ТО1-1,2,7; ТО2-3,4,8) та 13X11H2B2MФ (5,6,9)

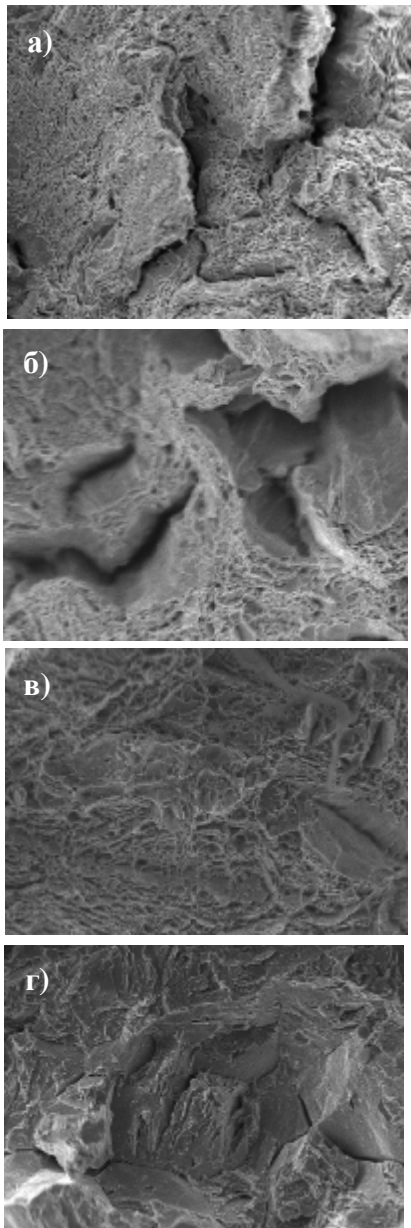


Рис. 2. Мікроструктурні особливості руйнування у водні сталі 13X11H2B2MФ за короткотривалого розтягу ($\times 1000$)

Осередком руйнування можуть бути включення або часточка іншої фази, які при великих пластичних деформаціях кристалічної ґратки швидко руйнуються, що веде до утворення в них пустот та підвищення концентрації напружень і локального збільшення деформації.

Деформування зразків у водні супроводжується формуванням сітки глибоких поверхневих тріщин, з наступним їх об'єднанням, утворюється «водневий злам» у зонах локалізації пластичної деформації на міжфазних та міжзеренних межах, що викликане великою щільністю поверхонь поділу (див. рис. 2,г). Топологія поверхні руйнування показала, що пластична деформація локалізується в дуже тонких ділянках, де проходить руйнування по сколу і міжзеренному механізму, що визначається мартенситною структурою сталей і параметрами випро-

бувань. Окрихчувальний вплив водневого середовища на морфологію зламу проявляється в інтервалі температур 293...473 К, а за 723 К відмінностей на поверхні зламу у водні та вакуумі за тисків 35 МПа немає.

Вплив водню на малоциклово довговічність та характер руйнування сталі 15X12H2MФАВ і 13X11H2B2MФ. За малоциклового навантаження характерним є деформування в пластичній області з нагромадженням односторонньої деформації, що відповідає випробуванням за схемою жорсткого навантаження та більшою мірою відповідає роботі сучасних установок обмеженого терміну служби. При циклічному навантаженні, як відомо [5], опір деформуванню і руйнуванню визначається пластичними властивостями сталей. Тому викликає інтерес дослідження, яка з двох характеристик матеріалу при жорсткому навантаженні, коли повна амплітуди деформації (пружна плюс пластична складова) залишається сталою, а рівень σ змінюється від циклу до циклу — міцність чи пластичність є важливішою при оцінюванні малоциклової витривалості. Результати випробувань по жорсткій схемі навантаження подають у вигляді залежності розмах або амплітуда деформації — кількість циклів до руйнування.

Відомо [1, 3, 4, 6], малоциклово довговічність є найчутливішою характеристикою водневої деградації конструкційних матеріалів, причому закономірності окрихчення сталі 15X12H2MФАВ (ТО1, ТО2) і 13X11H2B2MФ за малоциклового навантаження у газоподібному водні є типовими для мартенситно-аустенітних сталей. Отримано залежності довговічності сталей від амплітуди деформації при малоциклової втомі у водні і гелії за тиску 35 МПа та температур 293, 483 і 723 К (табл. 3).

Таблиця 3

Малоциклово довговічність зразків зі сталей за різних умов випробувань у гелії та водні

| Т, К | ε, % | Кількість циклів до руйнування, коефіцієнт впливу водню | | |
|------|------|---|-----------|--------|
| | | 35 МПа, He | 35 МПа, H | β |
| 293 | 0,8 | 9497 | 935 | 0,10 |
| | 1,2 | 3122 | 344 | 0,121 |
| | 1,6 | 1029 | 43 | 0,042 |
| 723 | 0,8 | 9643 | 9701 | 1,01 |
| | 1,2 | 2965 | 2882 | 0,97 |
| | 1,6 | 1265 | 1319 | 1,04 |
| 293 | 0,8 | 10250 | 1138 | 0,111 |
| | 1,2 | 2828 | 310 | 0,1096 |
| | 1,6 | 975 | 47 | 0,048 |
| 723 | 0,8 | 10342 | 10549 | 1,02 |
| | 1,2 | 2922 | 2878 | 0,985 |
| | 1,6 | 1337 | 1370 | 1,025 |
| 293 | 0,8 | 11992 | 1604 | 0,134 |
| | 1,2 | 2765 | 387 | 0,12 |
| | 1,6 | 1453 | 99 | 0,068 |
| 723 | 0,8 | 12975 | 12911 | 0,995 |
| | 1,2 | 2944 | 2811 | 0,955 |
| | 1,6 | 1557 | 1573 | 1,01 |

Перед цим була визначена залежність довговічності сталей від тиску водню 0,4, 2,5, 10,0, 35 МПа при температурі 293 К. Різке падіння довговічності досліджених сталей з ростом тиску водню зафіксовано при тиску 2,5 МПа. Максимальне падіння довговічності за кімнатної температури 293 К при тиску водню 10 МПа склало 15 — 20 разів. Подальше підвищення тиску водню до 35 МПа не істотно вплинуло на малоциклову довговічність сталі 15X12H2MФАВ (ТО1, ТО2) і 13X11H2B2MФ.

Порівняння результатів малоциклової довговічності сталей (див. табл. 3) дає підстави зробити висновок, що сталь 13X11H2B2MФ менш чутлива до дії водню за температур випробувань 293 — 483 К, ніж сталь 15X12H2MФАВ (ТО1, ТО2). За температури 723 К характеристики малоциклової довговічності сталей 13X11H2B2MФ у середовищі водню і гелію вищі, ніж у сталі 15X12H2MФАВ (ТО1, ТО2). З ростом температури вплив водневої атмосфери щезає і за температури 723 К значення довговічності зразків у гелії та водні під тиском 35 МПа знаходяться в межах розкиду експериментальних результатів (див. табл. 2, рис. 3).

Зі збільшенням амплітуди деформації чутливість до дії водню зростає (рис. 3), що характерно для високоміцних матеріалів типу низьковідпущеної сталі 50ХН (сорбіт) і сталі 03X12H10MT (мартенсит + аустеніт) [5].

Характер руйнування сталі 13X11H2B2MФ за малоциклового навантаження у нейтральному середовищі — втомний з відповідною боріздатною структурою зламу (рис. 4,а). Зародження тріщин відбувається на крупних приповерхневих карбідах, або в зонах локалізації пластичної деформації (прошарки залишкового аустеніту та поверхні поділу мартенситних пластин). При випробуваннях у середовищі водню зародження тріщин проходить так, як на повітрі в зонах сильно локалізованої деформації. На поверхні зламу з'являються ділянки мартенситного квазісколу (рис. 4,б), утворені за рахунок руйнування по межах елементів структури (мартенситні пластинки). Присутність у структурі сталі ділянок залишкового аустеніту сприяє міжзеренному руйнуванню в присутності водню (рис. 4,б). За невеликих тисків, до 3 МПа, і кімнатної температури в зламах зберігаються боріздатні ділянки мікрорельєфу. З підвищенням тиску

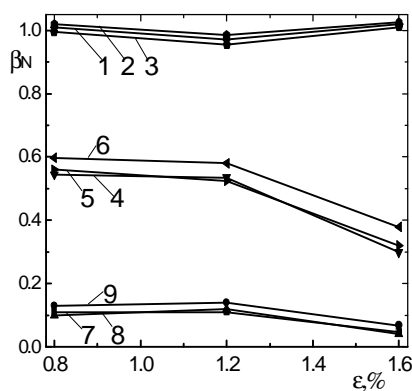


Рис. 3. Амплітудні залежності коефіцієнта впливу водню під тиском 35 МПа на малоциклову довговічність β_n зразків зі сталей 15X12H2MФАВ (ТО1-1,4,7; ТО2-2,5,8) та 13X11H2B2MФ (3,6,9) за температур 283 (7-9), 483 (4-6) і 673 К (1-3)

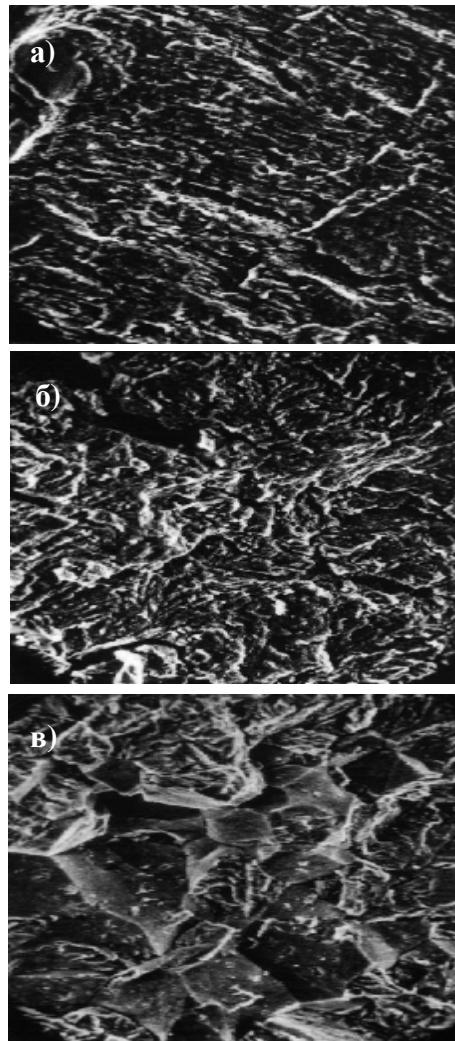


Рис. 4. Мікроструктурні особливості руйнування у водні сталі 15X12H2MФАВ за малоциклового згину (а,б,в) ($\times 1005$)

водню переважачим механізмом руйнування стає мартенситний квазіскол та міжзеренне руйнування, частка якого сягає 80 % поверхні руйнування. З підвищенням температури вплив водню на характер руйнування зменшується і за 723 К на поверхні зламу відсутні ознаки присутності водневої атмосфери.

Проведені фрактографічні дослідження сталей з мартенситно-аустенітною структурою показали, що за короткотривалого статичного та малоциклового навантаження основну роль у водневому окрихченні відіграють поверхні поділу мартенсит — аустеніт та межі мартенситних пластин.

Авторами [7] отримано характер локального розподілу водню в структурі мартенситних сталей. Максимальною є його концентрація на міжфазних та міжзеренних межах за будь-якого фазового складу та походження мартенситу, що викликано наявністю домішок — інгібіторів рекомбінації водню. Висока концентрації водню на межах зерен спричиняє руйнування на поверхнях, які є локальними центрами «пікових» мікронапружень, участками локалізації пластичної деформації і мікролокальними осеред-

ками руйнування у водні. При температурі 723 К відбуваються релаксаційні процеси — змінюються мікронапруження на міжфазних межах і поверхнях поділу мартенситних пластин, що послаблює окрихчувальний вплив водневого середовища.

Висновки. 1. Максимальне окрихчення сталей 15X12H2MФАВ (ТО1, ТО2) і 13X11H2B2MФ спостерігається в околі кімнатної температури за тиску 35 МПа, коли характеристики пластичності δ і ψ знижуються відповідно у 3 та 4 — 5 разів, малоциклова довговічність — у 15 — 20 разів

2. Для досліджених сталей окрихчувальний вплив водневого середовища знаходиться в інтервалі температур 293...483 К за випробувань на короткотривалий розтяг та малоциклово втому, а при температурі 723 К властивості у вакуумі та в присутності водню є однаковими.

3. Незалежно від структури, хімічного складу та термічного оброблення присутність водню не впливає на характеристики міцності (σ_b , і $\sigma_{0.2}$), а температурні залежності пластичності (δ і ψ) корелюють з ходом кривих малоциклової втоми, 4...5 кратному зменшенню у відповідає 4...8 кратне пониження довговічності.

4. Збільшення амплітуди циклічної деформації за сталої частоти та ступеня асиметрії приводить до посилення дії водневого середовища за температури 293 К.

5. Мікрофрактографічні дослідження зламів зразків у водні за статичного розтягу (поверхня зразка) та малоциклової втоми показали, що водень сприяє зародженню мікротріщин у місцях локалізації пластичної деформації і максимальної дефектності на межах мартенсит — аустеніт або мартенсит — карбід.

Література

1. Андрейків О.С., Никифорчин Г.М., Ткачов В.І. Міцність і руйнування металічних матеріалів і елементів

конструкцій у водневмістких середовищах // Фізико-механічний інститут: Поступ і здобутки. — Львів, 2001. — С. 248—286.

2. Расчет элементов конструкций водородной энергетики на прочность / А.И.Белогуров, В.С. Рачук, М.А.Рудис, А.М.Сушков, В.И.Холодный // Физ.-хим. механика материалов. — 2004. — №6. — С. 89—94.

3. Ткачев В.И., Холодный В.И., Левина И.Н. Работоспособность сталей и сплавов в среде водорода. — Львов: Вертикаль, 1999. — 255 с.

4. Ткачов В.І., Іваськевич Л.М., Витвицький В.І. Методичні аспекти визначення водневої тривкості сталей // Фіз.-хім. механіка матеріалів. — 2002. — №4. — С. 17—25.

5. Coffin L. F. Study of Effects of Cyclic Thermal Stress in a Ductile Metal. — Trans. ASME. — 1954. — 76. — P. 931.

6. Ткачов В.І., Іваськевич Л.М., Витвицький В.І. Розробка аустенітної хромомарганцевої сталі з високою відпорністю до водню // Фіз.-хім. механіка матеріалів. — 2005. — №5. — С. 95—100.

7. Бокштейн С.З., Гинзбург С.С., Кишкин С.Т. и др. Автордиография поверхностей раздела и структурная стабильность сплавов. — М.: Металлургия, 1987. — 270 с.

Отримана 22.09.08

A. Balitskii, V. Mochulskyi

High-temperature hydrogen resistance of martensitic steels

Karpenko Physico-Mechanical Institute of National Academy of Sciences of Ukraine, Lviv

The effect of hydrogen under the pressure 35 MPa on the mechanical properties of 15X12H2MФАВ and 13X11H2B2MФ steels at strain rate 1,0 mm/min and cyclic deformation with amplitude 0,8...1,6% and frequency 0,5 Hz at temperature range 293 ... 723 K has been investigated. The influence of chemical composition and structure state on the hydrogen embrittlement degree and fractographic peculiarities at hydrogen presence have been analyzed.

21 01 01 2009

МІЖНАРОДНА НАУКОВА КОНФЕРЕНЦІЯ

СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ МЕХАНІКИ

(до 70-річчя кафедри механіки
ЛНУ ім. І. Франка)

7 — 9 грудня 2009 р.

Адреса оргкомітету:

Кафедра механіки, Львівський національний університет імені Івана Франка,
вул. Університетська, 1, 79000, м. Львів, Україна.

Тел.: (032)-2394370

E-mail: kafmech@franko.lviv.ua

sulym@franko.lviv.ua