

## **Оцінка механічних властивостей сталей з урахуванням фазно-структурного чинника. Повідомлення 2. Визначення працездатності сталей в агресивних середовищах за результатами випробувань на повітрі**

**В. І. Витвицький, М. П. Бережницька, Р. В. Чепіль**

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

*Запропоновано застосування фазно-механічного підходу до аналітичної оцінки працездатності сталей у водні і водневмісних агресивних середовищах. За відомими даними узагальнено поведінку 50 сталей і одержано тісні кореляційні залежності між статичними властивостями сталей на повітрі, їх хімічним складом та характеристиками статичної, багаторазової та малоциклової втоми в досліджуваних середовищах. Розбіжність між фактичними і розрахунковими даними не перевищує 8...18%.*

**Ключові слова:** корозійні середовища, коефіцієнт стабільності аустеніту, малоциклова втома, границя корозійної втоми, порогове напруження сульфідного розтріскування.

**Аналіз проблеми.** Реалізація програм водневої енергетики пов'язана з вирішенням ряду складних завдань. Одне з головних – розробка нових висококомірних конструкційних матеріалів, здатних за визначений час функціонувати у водневмісних середовищах. Завдяки властивості водню ініціювати раптове руйнування проблема “водневої деградації” є актуальною [1]. У зв'язку з цим виникає потреба оцінки впливу водню на механічні характеристики конструкційних матеріалів. Окрім того, у багатьох випадках деформаційні процеси, викликані водневою деполяризацією на катодних ділянках, є основною причиною корозійної пошкодженості й руйнування матеріалів за навантажень у рідких водневмісних агресивних середовищах [2]. Ефективні методи підвищення стійкості матеріалів повинні базуватися на достовірній інформації стосовно їх ресурсу. Її можна одержати, об'єднавши наявні дані в узагальнюючі залежності, що пов'язують вихідні механічні властивості з показниками, відповідальними за опір у конкретних умовах експлуатації. Цьому питанню присвячено роботи [3, 4], але при спробах розповсюдження запропонованих у них залежностей на ширший загал матеріалів та умов експлуатації розбіжність між фактичними і розрахунковими даними стає неприйнятною.

Метою роботи є одержання узагальнюючих залежностей між властивостями широкого класу сталей за різних навантажень на повітрі та у водні і водневмісних агресивних середовищах із урахуванням фазно-структурного чинника.

**Методика досліджень.** За даними експериментальних досліджень [4–7] узагальнено результати зміни втомних характеристик матеріалів за статичного, мало- та багатоциклового навантаження у газоподібному водні та рідких водневмісних середовищах, зокрема у 3%-ному водному розчині NaCl і 3%-ному водному розчині NaCl + 0,5% CH<sub>3</sub>COOH+H<sub>2</sub>S. Для уніфікованої

оцінки впливу середовищ на службові характеристики використовували коефіцієнт  $\beta_i = \beta_N; \beta_C; \beta_{H_2S}$  (див. нижче), який визначається співвідношенням значень конкретних показників у середовищі і на повітрі. Кількісний показник хімічного складу  $A_\gamma$ , що характеризує рівноважний фазно-структурний стан сталей, розраховували та використовували за методикою [8].

**Водень високого тиску.** Малоциклова втома є найчутливішим до дії водню видом навантаження [9], а показником максимального його впливу є границя водневої деградації – мінімальна кількість циклів до руйнування для кожного матеріалу, яка не зменшується з подальшим зростанням тиску водню за конкретної амплітуди циклічної деформації ( $\epsilon$ ) [10]. Для корозійностійких сталей таким є тиск  $P_H = 10...35$  МПа. Вплив водню оцінювали за даними випробувань 15 сталей з використанням коефіцієнта  $\beta_N$ , який визначали за відношенням довговічностей сталей у газоподібному водні ( $N_H$ ) при  $P_H = 35$  МПа і на повітрі ( $N$ ), тобто  $\beta_N = N_H/N$  [5]. Відносна деформація плоских гладких зразків чистим згином становила 0,8; 1,2; 1,6% за частоти циклів 0,5 Гц. Температура досліджень складала 293 К. Інформацію про матеріали, результати випробувань та розрахунків наведено у табл. 1.

**Границя корозійної втоми.** Вплив корозійного середовища на багатоциклово втому оцінювали за допомогою коефіцієнта  $\beta_{-1c} = (\sigma_{-1c}/\sigma_{-1})$ , де  $\sigma_{-1c}$  – границя втоми при обертовому згині у 3%-ному водному розчині NaCl на базі  $5 \cdot 10^7$  цикл;  $\sigma_{-1}$  – те ж на повітрі на базі  $10^7$  цикл. Розглядали 26 корозійностійких сталей різних структурних класів (табл. 2) [4–7]. Ряд матеріалів досліджували після різних термічних обробок.

**Сульфідне розтріскування.** Сульфідне розтріскування (СР) трубопроводів та нафтогазового обладнання є актуальною проблемою, що пов'язана з освоєнням нафтових і газових родовищ, в яких міститься сірководень. Для оцінки схильності до СР сталей і сплавів та їх зварних з'єднань загальноприйнятим є метод NACE TM 01-77-90. Згідно з ним зразки діаметром 6,4 мм та довжиною робочої частини  $l_p = 25,4$  мм випробовують під статичним навантаженням у розчині NACE (5%-ний водний розчин NaCl + 0,5%  $CH_3COOH$  +  $H_2S$ , насичення до 1800...2600 мг/л) при температурі 293 К. Схильність до корозійного розтріскування оцінюють за пороговим напруженням  $\sigma_{пор}$  на базі 720 годин. Вживаним критерієм придатності сплаву до експлуатації в середовищах із високим вмістом сірководню є коефіцієнт  $\beta_{H_2S} = \sigma_{пор}/\sigma_{0,2}$ . Якщо він більший за 0,8, то матеріал відповідає вимогам роботи в даних умовах. Тут використовували результати роботи [6], в якій досліджувалась поведінка дев'яти марок сталей різних структурних класів (табл. 3).

Із метою встановлення кореляційних залежностей між властивостями матеріалу на повітрі й у середовищах як механічна складова аргументу використано єдиний параметр, який враховує спільну для розглянутих випадків специфіку пошкодженості та руйнування. При цьому основною характерною особливістю є локалізація деформаційних процесів [9]. Опірність локалізації пошкоджень як така контролюється здатністю матеріалу до рівномірної пластичної деформації. Чим вона більша, тим вище опірність. Цю здатність можна кількісно оцінити енергетичним параметром  $H_0/H_{пр}$ , де  $H_0 = 0,5(S_B + \sigma_{0,2}) \ln(1 + \delta_p)$  –

Т а б л и ц я 1

Механічні властивості, структура, малоциклова довговічність на повітрі й у водні ( $P_H = 35$  МПа), коефіцієнти впливу водню для корозійностійких сталей

Сталь	$\sigma_v$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	$\delta_p$ , %	$A_y$	Структура	$N$ , цикл, при $\epsilon$ , %				$\beta_N$ при $\epsilon$ , %			
								експеримент				розрахунок			
								1,6	1,2	1,0	11	1,6	1,2	1,3	14
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14		
08X17T	460	260	37	66	26	0,152	Ф	$\frac{800}{70}$			0,09				
20X14H3M2B	1000	790	17	55	9	0,72	A+M+K	$\frac{1000}{42}$			0,04				
02X11H11TM	1000	930	20	75	9	0,79	A+M+I	$\frac{1300}{70}$			0,05				
03X12H9MT	1080	940	20	70	10	0,93	A+M	$\frac{2100}{170}$			0,08				
08X18H10T	610	310	61	61	48	1	A+M <sub>лсф</sub>	$\frac{1800}{600}$	$\frac{3000}{1200}$	$\frac{12000}{2100}$	$\frac{0,33^*}{(0,31)}$	$\frac{0,40^*}{(0,38)}$	$\frac{0,18^*}{(0,18)}$		
03X11H8K4M2ФВД	1100	1070	18	65	9	1,07	A+M+I	$\frac{1700}{380}$			$\frac{0,22^*}{(0,15)}$				
06X12Г20АН5	800	420	54	62	43	1,64	A	$\frac{2600}{1350}$			$\frac{0,52^*}{(0,6)}$				
06X27H16AГ6	810	470	52	66	40	1,74	A	$\frac{4100}{2600}$	$\frac{8700}{4800}$	$\frac{28000}{12000}$	$\frac{0,63^*}{(0,58)}$	$\frac{0,55^*}{(0,56)}$	$\frac{0,43^*}{(0,33)}$		
03X19H23B2T	550	220	48	50	40	1,74	A	$\frac{1850}{1850}$			$\frac{1,00^*}{(0,84)}$				
04X12H36T3НОГ	1100	810	31	51	20	1,86	A+I <sub>min</sub>	$\frac{2750}{1370}$	$\frac{6300}{2350}$	$\frac{28000}{6050}$	$\frac{0,50^*}{(0,45)}$	$\frac{0,37^*}{(0,43)}$	$\frac{0,22^*}{(0,25)}$		

Продовження табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
X11H21T2PЮ	1180	890	30	46	20	2,04	A+I	$\frac{3100}{2300}$			0,74* (0,50)		
06X14Г20АН10М	810	570	62	73	48	2,44	A	$\frac{3200}{2300}$			0,72* (0,84)		
03X11H43M2T (гартування+старіння)	1250	820	29	49	18	2,52	A+I	$\frac{2500}{1700}$	4900 3800	$\frac{27500}{12100}$	0,68* (0,76)		
03X11H43M2T (гартування)	815	505	37	38	25	2,52	A+I <sub>min</sub>	$\frac{2660}{2690}$			1,01* (0,85)	0,78* (0,85)	0,44* (0,47)
03X11H43M2T (перестарування)	1180	770	20,5	23,5	15	2,52	A+I	$\frac{1590}{1090}$			0,69* (0,75)		

**Примітки:** 1. Ф – ферит; А – аустеніт; М – мартенсит термообробки; М<sub>деф</sub> – мартенсит деформації; К – карбід; І – інтерметаліди. 2. Над рискою наведено дані, отримані на повітрі, під рискою – у воді. 3. Зрочкою відмічено дані експерименту, у дужках – результати розрахунку за рівняннями (1)–(3).

Т а б л и ц я 2

## Експериментальні та розрахункові значення механічних характеристик

№ п/п	Сталь	d, мм	Експеримент						Розрахунок						
			$\sigma_v$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	$\sigma_{-1}$ , МПа	$\sigma_{-1c}$ , МПа	$\beta_{-1c}$	$A_T$	$\delta_p$ , %	$\beta_{-1c}$	Похибка, %	$\sigma_{-1c}$ , МПа	Похибка, %
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	15X16H2M	10	985	805	16,5	44,5	530	160	0,302	0,57	6,9	0,29	4,3	$\frac{153,7}{145,46}$	$\frac{3,9}{9,1}$
2	2X13	10	1000	850	17,0	65,0	480	110	0,229	0,55	7,0	0,29	25,4	$\frac{139,2}{148,02}$	$\frac{26,5}{34,6}$
3	1X12H2ВФ	10	970	865	18,5	59,5	515	140	0,272	0,63	7,7	0,27	1,8	$\frac{139,1}{131,38}$	$\frac{0,7}{6,2}$



Продовження табл. 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
15	12X17	10	450	300	32,4*		240	150	0,625	0,30	27,7	0,51	17,8	$\frac{122,4}{127,66}$	$\frac{18,4}{14,9}$
16	14X17H2	10	950	750	15,6*		490	190	0,388	0,51	6,4	0,42	7,1	$\frac{205,8}{205,88}$	$\frac{8,3}{8,4}$
17	12X13	10	610	400	34,8*		310	150	0,484	0,27	23,2	0,51	5,6	$\frac{158,1}{173,76}$	$\frac{5,4}{15,8}$
18	08X22H6T	10	720	430	21,7*		400	280	0,700	0,63	15,8	0,75	7,2	$\frac{300,0}{273,97}$	$\frac{7,1}{2,2}$
19	08X21H6M2T	10	750	470	20,2*		420	305	0,726	0,57	14,6	0,67	7,6	$\frac{283,9}{257,75}$	$\frac{6,9}{14,7}$
20	12X18H9	7,5	645	341	48,4*		250	205	0,820	1,049	41,9	0,84	2,9	$\frac{210,0}{249,65}$	$\frac{2,4}{21,8}$
21	12X18H10T	7,5	631	251	61,6*		265	245	0,925	1,125	53,3	0,92	0,6	$\frac{243,8}{261,92}$	$\frac{0,5}{6,9}$
22	07X16H4Б (Ø5 мм)	5	966	810	17,4*		510	230	0,451	0,32	6,4	0,51	14,1	$\frac{260,1}{266,06}$	$\frac{13,1}{15,7}$
23	08X18Г12H5АБ	5	800	520	30,4*		230	220	0,957	1,922	24,8	0,96	0,0	$\frac{220,8}{223,87}$	$\frac{0,4}{1,8}$
24	08X17H16T	5	890	790	9,13*		470	228	0,485	0,699	4,6	0,52	8,2	$\frac{244,4}{229,53}$	$\frac{7,2}{0,7}$
25	09X17H7Ю	5	870	780	8,5*		460	250	0,543	0,743	4,5	0,52	4,4	$\frac{239,2}{222,19}$	$\frac{4,3}{11,1}$

Продовження табл. 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
26	10X26H5M2	5	640	530	23,4*		310	215	0,694	0,439	16,1	0,62	11,1	$\frac{192,2}{209,93}$	$\frac{10,6}{2,4}$

**Примітки.** Над рискою наведено експериментальні значення  $\sigma_{в}$ ;  $\sigma_{0,2}$ ;  $\delta$ ;  $\sigma_{-1}$ , під рискою – експериментальні значення  $\sigma_{в}$ ;  $\sigma_{0,2}$ ;  $\delta$  та розраховані  $\sigma_{-1}$  із таблиці роботи [14], графа 7. Зірочкою позначено розрахункові значення  $\delta$ .

Т а б л и ц я 3

**Експериментальні і розрахункові порогові напруження та коефіцієнти стабільності аустеніту сталей**

Сталь	Експеримент						Розрахунок					
	$\sigma_{в}$ МПа	$\sigma_{0,2}$ МПа	$\psi$ , %	$\delta$ , %	$\sigma_{пор}$ МПа	$A_{\gamma}$	$\delta_p$	$\beta_{H_2S}$	$\sigma_{пор}$ МПа	Похибка, %		
20	474	290	47	18	150	0,243	16	0,55	159,5	6,5		
20ЮЧ	480	240	55	32	195	0,203	27	0,88	211,2	8,1		
14ГБ	520	470	43	16	250	0,178	11	0,56	263,2	5,2		
17ГС(СШ)	500	345	–	22	210	0,205	19	0,63	217,3	3,5		
12Х1МФ	463	255	44	20	170	0,155	17	0,67	197,65	16,3		
10ХН5МФ	590	467	68	25	145	0,360	17	0,28	130,76	9,6		
20Х13	500	370	40	19	< 100 (~90)	0,493	16	0,27	99,9	9,3		
12Х18Н10Т	540	220	48	36	~1	1,201	31	–	–	–		
02Х20Н6М3	1118	771	–	26	290	0,730	19	0,40	308,4	5,8		

загальне енергопоглинання за рівномірного розтягу;  $H_{пр} \approx \sigma_{0,2} \ln(1 + \delta_p)$  – робота пружних сил за істинною діаграмою розтягу (лінійна апроксимація) – рис. 1;  $S_B = \sigma_B(1 + \delta_p)$  – дійсний тимчасовий опір;  $\delta_p$  – рівномірне видовження. Таким чином, шуканий параметр матиме вигляд  $\frac{H_0}{H_{пр}} = \frac{1}{2} \left( \frac{S_B}{\sigma_{0,2}} + 1 \right)$ . Далі

будували залежності в координатах  $A_\gamma^m \beta_i^n - A_\gamma^k \left[ \frac{1}{2} \left( \frac{S_B}{\sigma_{0,2}} + 1 \right) \right]^l$ . Шляхом ітерації значення показників  $m$ ,  $n$ ,  $k$  та  $l$  оптимізували до одержання рівнянь апроксимації з коефіцієнтом кореляції  $R > 0,99$ .

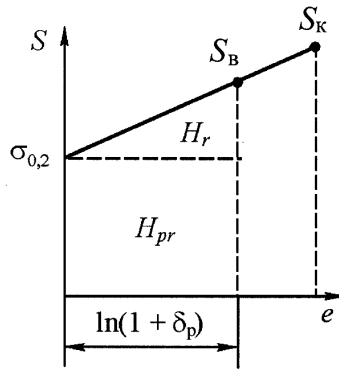


Рис. 1. Істинна діаграма розтягу.

**Результати досліджень та їх обговорення. Водень високого тиску.** На рис. 2,а представлено залежності між вихідними механічними властивостями, хімічним складом та впливом водню на малоциклову втому корозійних сталей, отримані на основі рівняння  $A_\gamma^m a^n = f(A_\gamma^k b^l)$  ( $a$  і  $b$  – показники механічних властивостей, між якими встановлюються залежності;  $m$ ,  $n$ ,  $k$ ,  $l$  – коефіцієнти,  $m, k = 2$ ;  $n, l = 0,5$ ) вищеописаним способом для кожної амплітуди циклічної деформації  $\epsilon$  з урахуванням та без урахування впливу структурного параметра  $A_\gamma$ . Залежності апроксимували рівняннями виду  $y = ax^b$  з коефіцієнтом кореляції  $R > 0,99$  і знаходили  $\beta_N$  ( $\beta_N = N_H/N$ ;  $N_H$  – малоциклова довговічність у водні;  $N$  – те ж на повітрі):

для  $\epsilon = 1,6\%$  маємо:

$$A_\gamma^2 \sqrt{\beta_N} = 0,3508 \left( A_\gamma^2 \sqrt{\frac{1}{2} \left( \frac{S_B}{\sigma_{0,2}} + 1 \right)} \right)^{1,3802},$$

звідки

$$\beta_N = 0,12306 A_\gamma^{1,5208} \left( \frac{1}{2} \left( \frac{S_B}{\sigma_{0,2}} + 1 \right) \right)^{1,3802} \quad (1)$$

( $R = 0,9930$ ; середня похибка 18,0%);



для  $\varepsilon = 1,2\%$ :

$$\beta_N = 0,16113 A_\gamma^{1,0328} \left( \frac{1}{2} \left( \frac{S_B}{\sigma_{0,2}} + 1 \right) \right)^{1,2582} \quad (2)$$

( $R = 0,9981$ ; середня похибка 8,25%);

для  $\varepsilon = 0,8\%$ :

$$\beta_N = 0,07365 A_\gamma^{1,3996} \left( \frac{1}{2} \left( \frac{S_B}{\sigma_{0,2}} + 1 \right) \right)^{1,3499} \quad (3)$$

( $R = 0,9954$ ; середня похибка 12,8%).

Матеріали з  $A_\gamma < 1$  внаслідок катастрофічного окрихчення у водні ( $\beta_N < 0,1$ ) виокремлено в групу непрацездатних структур і вони не беруться до уваги в розрахунках.

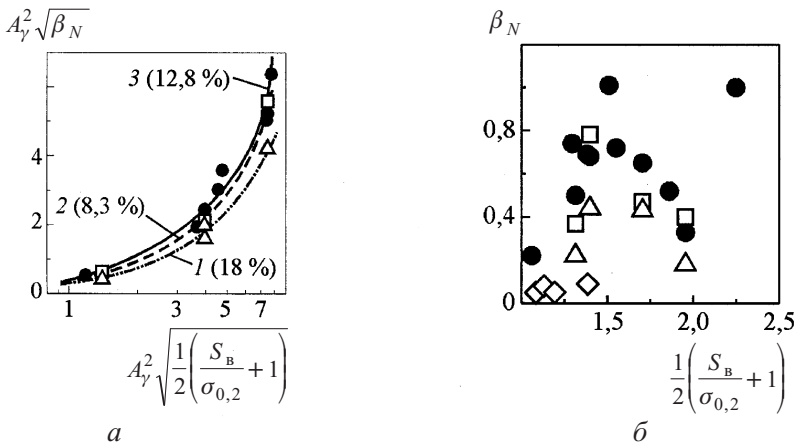


Рис. 2. Залежність між механічними властивостями сталей та коефіцієнтом впливу водню  $\beta_N$  на малоциклову довговічність з урахуванням (а) і без урахування (б)  $A_\gamma$ : 1,  $\Delta$  –  $\varepsilon = 1,6\%$ ; 2,  $\square$  –  $\varepsilon = 1,2\%$ ; 3,  $\bullet$  –  $\varepsilon = 0,8\%$ . (Тут і на рис. 3, 4: цифри в дужках – середня похибка.)

Аналіз рис. 2,а і даних табл. 1 показує, що стійкість до водню підвищується зі зростанням  $A_\gamma$  та резерву зміцнення  $S_B/\sigma_{0,2}$ . Таким чином, основним напрямком оптимізації матеріалів із точки зору підвищення їх воднетривкості є виваженість балансу у сполученні стабільність аустеніту – міцність. При цьому роль фазно-структурного показника  $A_\gamma$  є найвагомішою. За рахунок зміни  $A_\gamma$  можна в певній мірі мінімізувати традиційно негативний вплив на воднетривкість факторів, що зумовлюють підвищення міцності [11]. Наприклад, підвищувати  $A_\gamma$  можна не збільшуючи вміст аустенітоутворюючих елементів, а лише утримуючи в оптимальних рамках вміст феритоутворюючих елементів або хромеквівалента (CrE), тобто його бажано зберегти в інтервалі значень 17...20 (за діаграмою Шефлера та діаграмою Fe–Cr–Ni-сплавів при Cr, CrE=18 потрібно мінімум  $\gamma$ -стабілізуючих елементів для утворення повністю аустенітної структури [12]).

*Границя корозійної втоми.* Аналіз даних табл. 2 показує, що зі зростанням  $A_\gamma$  зменшується негативний вплив середовища. Для врахування ролі масштабного фактора будували окремі залежності для зразків діаметром 5 і 7,5–10 мм (табл. 2). Оскільки для наведених в табл. 2 матеріалів [4] відсутні експериментальні значення відносного подовження та звуження, за розробленим раніше підходом [13] розраховували  $\delta$  і далі  $\delta_p$ . Також виділили у окрему групу матеріали, для яких було відоме експериментальне значення  $\delta$ , за його допомогою визначали  $\delta_p$ . Значення показників степеней складових координат є наступними:  $m = 2$ ;  $k = 1$ ;  $n, l = 0,5$  (рис. 3,а). Кореляційні залежності апроксимували кубічними або квадратичними поліномами, за якими визначали коефіцієнт  $\beta_{-1c}$  ( $\beta_{-1c} = \sigma_{-1c}/\sigma_{-1}$ ):

зразки діаметром 10 мм із матеріалів № 1–12 (табл. 2):

$$\beta_{-1c} = \left[ 1,3105 \left( \frac{S_B}{\sigma_{0,2}} + 1 \right) + \frac{2,743}{A_\gamma} \sqrt{\frac{1}{2} \left( \frac{S_B}{\sigma_{0,2}} + 1 \right)} - \frac{0,8673}{A_\gamma^2} \right]^2 \quad (4)$$

( $R = 0,9639$ , середня похибка 10,2%);

зразки діаметром 7,5 і 10 мм із матеріалів № 1–21 (табл. 2):

$$\beta_{-1c} = \left[ -0,4997 A_\gamma \left( \frac{1}{2} \left( \frac{S_B}{\sigma_{0,2}} + 1 \right) \right)^{3/2} + 1,57 \left( \frac{S_B}{\sigma_{0,2}} + 1 \right) - \frac{0,5765}{A_\gamma} \sqrt{\frac{1}{2} \left( \frac{S_B}{\sigma_{0,2}} + 1 \right)} + \frac{0,0911}{A_\gamma^2} \right]^2 \quad (5)$$

( $R = 0,9639$ , середня похибка 6,8%);

зразки діаметром 5 мм із матеріалів № 22–26 (табл. 2):

$$\beta_{-1c} = \left[ -0,3343 A_\gamma \left( \frac{S_B}{\sigma_{0,2}} + 1 \right) + \frac{0,0029}{A_\gamma} \sqrt{\frac{1}{2} \left( \frac{S_B}{\sigma_{0,2}} + 1 \right)} - \frac{0,0062}{A_\gamma^2} \right]^2 \quad (6)$$

( $R = 1$ , середня похибка 7,6%).

Криві на рис. 3,а розташовані симбатно одна під одною. Крок відставання відповідає невеликій постійній систематичній розбіжності між фактичними і розрахунковими даними. Для перевірки ефективності запропонованого підходу використали два варіанти. Згідно з першим вихідними параметрами слугували експериментальні значення  $\sigma_B$ ,  $\sigma_{0,2}$ ,  $\delta$  та  $\sigma_{-1}$ , згідно з другим – короточасні механічні властивості та розрахункові значення  $\sigma_{-1}$  (див. таблицю в повідомленні 1, колонка 8). Результати розрахунків наведено у табл. 2.

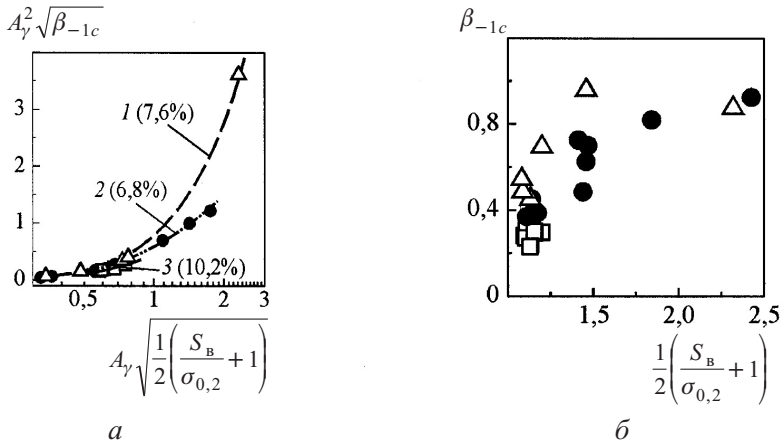


Рис. 3. Залежність між механічними властивостями сталей та коефіцієнтом впливу 3%-ного NaCl  $\beta_{-1c}$  на границю втоми з урахуванням (а) і без урахування  $A_\gamma$  (б): 1,  $\Delta$  –  $d = 5$  мм; 2,  $\square$  –  $d = 10$  мм; 3,  $\bullet$  –  $d = 7,5$  і  $10$  мм.

Вищенаведене дає змогу за хімічним складом та вихідними механічними властивостями (достатньо  $\sigma_B$  та  $\sigma_{0,2}$ ) кількісно визначати вплив корозійного середовища на зміну границі втоми без проведення додаткових випробувань або вимірювань у процесі експлуатації. Зіставлення показників (рис. 2,а і 3,а), за якими визначали коефіцієнти впливу водню на малоциклову втому та корозійного середовища на границю втоми, свідчить, що під час випробувань за наявності водню роль структурного фактора є суттєвішою, ніж за корозійного середовища.

*Сульфідне розтріскування.* Аналіз даних табл. 3 показує, що зі збільшенням  $A_\gamma$  опірність середовищу ( $\beta_{H_2S} = \sigma_{пор} / \sigma_{0,2}$ ) зменшується, зі зростанням  $\delta$  і  $S_B / \sigma_{0,2}$  – підвищується. Так, зменшення вмісту сірки у сталі 20 із 0,013 до 0,003% зумовлює зростання  $\delta$  з 18 до 32% і, як наслідок, зростання показника опірності локалізації пошкоджень  $0,5[(S_B / \sigma_{0,2}) + 1]$  і  $\sigma_{пор} / \sigma_{0,2}$ . Таким чином,  $A_\gamma$  і  $S_B / \sigma_{0,2}$  впливають на придатність сплавів до експлуатації у середовищі сірководню в протилежних напрямках, тобто в сірководні спостерігається інверсія дії фазного чинника. Із використанням вищенаведеного алгоритму побудували залежність (рис. 4,а) із показниками  $m, k = -2$ ;  $n, l = 0,5$ , яку апроксимували кубічним поліномом із коефіцієнтом кореляції  $R = 0,9999$ :

$$\beta_{H_2S} = \left[ \frac{0,0003}{A_\gamma^3} \left( \frac{1}{2} \left( \frac{S_B}{\sigma_{0,2}} + 1 \right) \right)^{3/2} + \frac{0,24}{A_\gamma^2} \left( \frac{S_B}{\sigma_{0,2}} + 1 \right) + 0,225 \sqrt{\frac{1}{2} \left( \frac{S_B}{\sigma_{0,2}} + 1 \right)} + 0,5788 A_\gamma^2 \right]^2 \quad (7)$$

(середня похибка 8%).

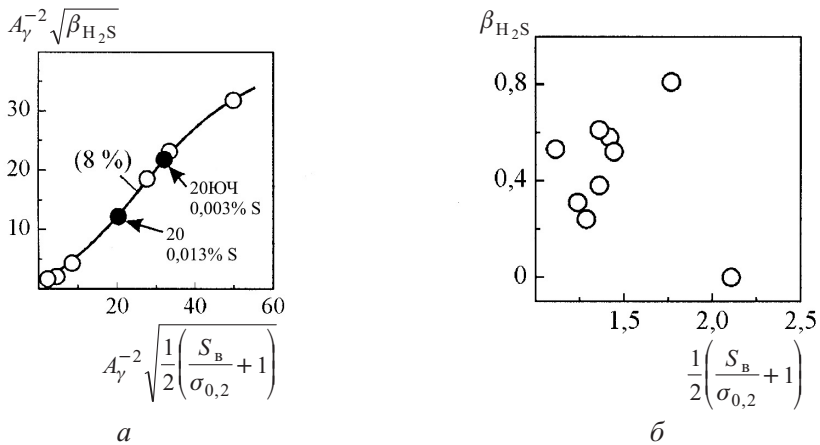


Рис. 4. Залежність між механічними властивостями сталей та коефіцієнтом впливу сірководневого середовища  $\beta_{H_2S}$  на порогове напруження розтріскування з урахуванням (а) і без урахування (б)  $A_y$ .

Доцільність урахування фазно-структурного чинника при аналітичній оцінці властивостей в середовищах видна з порівняння рис. 2–4.

Таким чином, використання розрахункової сталі хімічного складу  $A_y$  і механічного показника опірності локалізації пошкоджень, визначеного з дійсної діаграми розтягу, дозволяє вперше за єдиним методичним підходом одержати узагальнюючі аналітичні залежності між вихідними механічними властивостями сталей та їх службовими характеристиками за різних навантажень в агресивних середовищах: а) коефіцієнтом впливу водню високого тиску на малоциклову втому (15 сталей); б) коефіцієнтом впливу 3%-ного водного розчину NaCl на границю втоми (26 сталей), причому у зразків різних діаметрів окремі залежності; в) пороговим напруженням розтріскування (дев'ять сталей) у сірководневому середовищі. Вплив  $A_y$  кількісно і якісно відрізняється в залежності від виду навантаження і водневмісного середовища. Його роль в опірності водню та сірководню на степінь вища, ніж за корозійної втоми. При цьому в сірководні спостерігається інверсія дії фазного чинника. У всіх випадках внесок останнього в кореляцію суттєвіший, ніж роль механічного фактора. Одержані дані свідчать про методологічну ефективність запропонованого підходу до врахування фазно-структурного стану матеріалів при оцінці і прогнозуванні їх працездатності в агресивних середовищах за різних навантажень.

## Резюме

Предложено использование фазно-механического подхода к аналитической оценке работоспособности сталей в водороде и водородсодержащих агрессивных средах. С помощью литературных данных обобщено поведение 50 сталей и получены значимые корреляционные зависимости между статическими особенностями сталей на воздухе, их химическим составом и характеристиками статической, много- и малоциклической усталости в средах.

1. *Охрупчивание* конструкционных сталей и сплавов / Под ред. К. Л. Браента, С. К. Бенерджи: Пер. с англ. – М.: Металлургия, 1988. – 552 с.
2. *Коррозионная усталость* металлов: Тр. 1-го сов.-англ. семинара / Под ред. акад. Я. М. Колотыркина. – Киев: Наук. думка, 1982. – 372 с.
3. *Белогуров А. І., Рачук В. С., Рудіс М. А. та ін.* Розрахунок елементів конструкцій водневої енергетики на міцність // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2004. – **40**, № 6. – С. 89 – 94.
4. *Похмурський В., Хома М.* Вплив механічних властивостей і структурного стану корозійно тривких сталей на їхню витривалість у повітрі та корозійному середовищі // *Машинознавство*. – 2001. – № 4-5. – С. 13 – 16.
5. *Витвицький В. І.* Експериментально-аналітична оцінка впливу водню на малоциклову втому сталей // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2007. – **43**, № 5. – С. 54 – 60.
6. *Мелехов Р. К., Карвацький Л. М., Радкевич О. І. та ін.* Сульфідне розтріскування конструкційних сталей і сплавів // Там же. – 1998. – **39**, № 1. – С. 83 – 88.
7. *Каличак Т. Н.* Исследование некоторых физико-механических и электрохимических свойств мартенситных нержавеющей сталей: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – К., 1971. – 21 с.
8. *Витвицький В. І., Ткачов В. І., Бережницька М. П., Чепіль Р. В.* Оцінка механічних властивостей корозійнотривких сталей за статичного і малоциклового навантаження // *Пробл. прочності*. – 2007. – № 5. – С. 19 – 30.
9. *Витвицький В. І.* Воднетривкість сплавів на основі заліза, нікелю та титану // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2004. – **40**, № 6. – С. 7 – 18.
10. *Витвицький В. І.* Малоциклова довговічність сталей у водні високого тиску // Там же. – 2004. – № 1. – С. 55 – 59.
11. *Витвицький В. І., Ткачов В. І., Бережницька М. П., Чепіль Р. В.* Прогнозування довговічності корозійностійких сталей на повітрі і у водні високого тиску // *Машинознавство*. – 2006. – № 6. – С. 19 – 24.
12. *Пикеринг Ф. Б.* Физическое металловедение и разработка сталей: Пер. с англ. – М.: Металлургия, 1982. – 184 с.
13. *Витвицький В. І.* Структурно-механічна оцінка міцності та пластичності сплавів Fe, Fe–Ni, Ni-основи // *Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій: Зб. наук. праць*. – 2005. – Вип. 6. – С. 276 – 298.
14. *Витвицький В. І.* Оцінка механічних властивостей сталей з врахуванням фазно-структурного чинника. Повідомлення 1. Визначення границі втому на повітрі за статичною міцністю // *Пробл. прочності*. – 2010. – № 2. – С. 65 – 73.

Поступила 21. 06. 2009