

Оцінка механічних властивостей та фазно-структурного стану корозійно-стійких сталей за статичного і малоциклового навантажень

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

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

Використання коефіцієнта стабільності аустеніту дозволяє кількісно оцінити фазно-структурний стан корозійно-стійких сталей за хімічним складом. Його розраховують на основі хромових та нікелевих еквівалентів. За допомогою коефіцієнта стабільності аустеніту отримано кореляцію між механічними властивостями сталей за статичного навантаження. Запропоновано малоциклово довговічність визначати за хімічним складом та відносним звуженням.

Ключові слова: корозійно-стійкі сталі, механічні властивості, малоциклова довговічність, коефіцієнт стабільності аустеніту.

Вступ. Для розробки конструкційних матеріалів потрібно знати кількісні співвідношення, які б пов'язували хімічний склад сплавів, структуру та механічні властивості. Їх визначення та застосування на практиці є одним з актуальних і пріоритетних завдань матеріалознавства. Розробка нових металічних матеріалів і технологічних процесів на даний час здійснюється вартісними емпіричними методами. Використання існуючих кількісних залежностей обмежено вузькими діапазонами зміни хімічного складу, структури та властивостей. Серед корозійно-стійких матеріалів таку кореляцію встановлено лише для низькоміцних аустенітних сталей [1]. Запропоновано також ряд рівнянь, які пов'язують показники статичного та малоциклового навантажень [2, 3]. Хоча щодо їх застосування є певні застереження, оскільки розбіжність між даними експерименту і розрахунку може бути значною [3]. Окрім того, не вивчено питання про взаємозв'язок між статичними механічними властивостями. Основним недоліком відомих підходів є відсутність будь-якого кількісного показника, який би враховував за хімічним складом фазно-структурний стан матеріалів.

Мета досліджень – на прикладі корозійно-стійких хромистих і хромо-нікелевих сталей та сплавів різної міцності розробити кількісний показник сукупності елементів хімічного складу, який би характеризував фазно-структурний стан матеріалу, і оцінити можливість його застосування для визначення зв'язку між характеристиками міцності і пластичності, а також між властивостями за статичного і втомного малоциклового навантажень.

Методика та результати досліджень. *Визначення фазно-структурного показника.* Основним чинником, що формує деформаційну поведінку та значення службових характеристик (границь міцності σ_b та текучості $\sigma_{0,2}$, пластичності δ , ψ і малоциклової довговічності N) конкретного матеріалу, є структура з ОЦК- чи ГЦК-гратками. Для погрійних Fe–Cr–Ni-сплавів її встановлюють за відповідною діаграмою (рис. 1), яка визначає фазовий стан сталі в залежності від вмісту хрому та нікелю. У сплавах із більшою кіль-

кістю легуючих елементів замість Ni та Cr за Шефлером і Шнайдером [1] використовують хромові та нікелеві еквіваленти (CrE та NiE), які розраховують за відомими співвідношеннями:

$$CrE = [Cr] + 2[Si] + 1,5[Mo] + 5[V] + 5,5[Al] + 1,75[Nb] + 1,5[Ti] + 0,75[W]; \quad (1)$$

$$NiE = [Ni] + [Co] + 0,5[Mn] + 0,3[Cu] + 25[N] + 30[C], \quad (2)$$

тут у квадратних дужках вказано вміст елементів у масових відсотках.

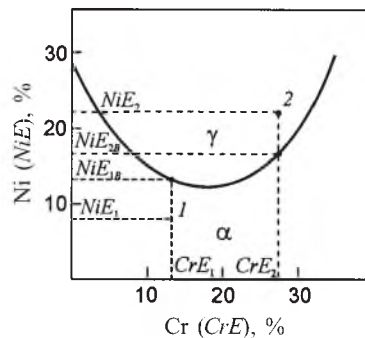


Рис. 1. Зміна фазового стану в потрійних Fe–Cr–Ni сплавах у залежності від вмісту Cr (CrE) та Ni (NiE): 1, 2 – визначення NiE_{1B} та NiE_{2B} у сплавах із координатами CrE , NiE , CrE_2 , NiE_2 ; парабола відповідає значенням NiE , мінімально достатнім для отримання 100%-ного аустеніту; γ – аустеніт, α – ферит або перехідні структури.

За цими співвідношеннями вплив 14 елементів зведено до двох еквівалентів (CrE та NiE). Із їх використанням визначали фазно-структурний показник. При цьому припускали, що розташування фазової кривої на рис. 1 не змінюється від заміни Cr та Ni на CrE та NiE і описується параболою

$$(NiE)_B = 0,0512(CrE)^2 - 1,843(CrE) + 28,6. \quad (3)$$

Фазовий стан (і, як наслідок, механізм деформування, а відтак, і властивості) матеріалу залежить від розташування точки з його координатами відносно концентраційної кривої, що розмежовує γ - та α -області. Для конкретного сплаву з певним хімічним складом за співвідношеннями (1), (2) визначали дійсні хромові та нікелеві еквіваленти. Після цього за рівнянням (3) розраховували базовий нікелевий еквівалент $(NiE)_B$, що відповідає конкретному значенню хромового еквівалента на параболі, і порівнювали його з дійсним нікелевим еквівалентом сплаву. На основі викладеного запропоновано використовувати для характеристики матеріалу коефіцієнт стабільності аустеніту $A_\gamma = (NiE)/(NiE)_B$, який показує, наскільки дійсний еквівалент вищий або нижчий за базовий. За змістом коефіцієнт A_γ є кількісною мірою надлишку або нестачі аустенітотвірних елементів у даному матеріалі для виникнення 100%-ного аустеніту.

Значення A_γ для ряду корозійно-стійких сталей основних структурних класів подано в табл. 1. Для феритних структур $A_\gamma = 0,15 \dots 0,44$, для мартенситних – $0,55 \dots 0,71$, для перехідних – $0,72 \dots 0,96$. Якщо $A_\gamma \approx 1$, то хімічний

склад збігається з мінімально достатньою кількістю елементів для утворення повністю аустенітної структури, наприклад безвуглецева сталь 00X18H12. Стабільність такого аустеніту легко порушується додатковим деформаційним або термічним впливом. Маються на увазі $\gamma \rightarrow \alpha$ -деформаційні перетворення різної кінетики в Cr–Ni- та Cr–Ni–Mn-сталях, низькотемпературні фазові переходи, тощо. Якщо $A_\gamma > 1$, то γ -фаза стабільна в широкому діапазоні умов експлуатації з властивими ГЦК-гратці резервами пластичної релаксації, енергією дефекту упаковки, можливостями дисперсійного твердіння, що визначають високотемпературні та корозійно-механічні властивості, тощо. Загалом, за даними табл. 1 A_γ змінюється симбатно з нікелевим еквівалентом матеріалів – зростанню аустенітотвірної здатності хімічних складів відповідає збільшення значень показника стабільності аустеніту і формування відповідних фазно-структурних станів.

Міцність і пластичність. Механічні властивості сталей (σ_b , $\sigma_{0,2}$, δ , ψ) визначали при статичному розтягуванні п'ятикратних гладких зразків діаметром 5 мм при 293 К з постійною швидкістю руху активного захвату 0,1 мм/хв на установці УМЕ-10ТМ. Загальний інтервал досліджуваних значень становив: $\sigma_b = 380 \dots 1340$ МПа; $\sigma_{0,2} = 200 \dots 1100$ МПа; $\delta = 12 \dots 72\%$; $\psi = 24 \dots 83\%$ (табл. 1). Характеристики сталей 1X13, 2X13, 1X12H2BMФБА, 15X16H2M, 1X18H10T, 04X11H43M2T після різних термічних обробок наведено в табл. 1.

Аналіз залежності між міцністю та границею текучості сталей показав, що вона є якісною – матеріали майже з однаковою границею текучості $\sigma_{0,2}$ можуть мати різні σ_b і A_γ (рис. 2,а). Це унеможливило їх кількісну оцінку. Якщо до основних характеристик сталей ввести показник стабільності аустеніту A_γ , то можна впорядкувати матеріали і отримати відповідні кількісні залежності. Тут шуканий вираз має наступний вигляд: $A_\gamma^m a^n = f(A_\gamma^k b^p)$, де a , b – показники механічних властивостей. Функцію f визначали графічно в координатах $Y = A_\gamma^m a^n$; $X = A_\gamma^k b^p$. Шляхом ітерації m , n , k та p координати та криву оптимізували так, щоб коефіцієнт кореляції рівняння апроксимації $R > 0,95$. Результат апроксимації вважали прийнятним, якщо розбіжність між фактичними і розрахованими значеннями не перевищувала похибки експериментальних результатів. Для побудови залежності між показниками міцності використовували координати $A_\gamma^m \sigma_b^n - A_\gamma^k \sigma_{0,2}^p$. Після описаних процедур та розрахунків побудували залежності $\sqrt{A_\gamma \sigma_b} - \sqrt{A_\gamma \sigma_{0,2}}$ (рис. 2,б), на підставі яких отримали чотири рівняння апроксимації (табл. 2), кожне з яких відповідає певному інтервалу значень $\sigma_{0,2}$:

I група (найнижча міцність), $200 \text{ МПа} \leq \sigma_{0,2} \leq 330 \text{ МПа}$: матеріали в гомогенному стані однофазного розчину заміщення з A_γ від 0,152 до 2,52 (сталі X5CrNi 18-12, 00X19H23B2T, X2CrNiMo 18-12, 08X18H10 (0,022% N), 1X18H10T, 08X17T, 03X21H32M3B (гартована));

II група, $380 \text{ МПа} \leq \sigma_{0,2} \leq 600 \text{ МПа}$: матеріали, леговані елементами заміщення та зміцнені розчинним азотом як елементом втілення (сталі 1X13 (після високого відпуску), X25H6M, 03X13AG19, 06X12Г20АН5, 06X27H16AG6, 06X14Г20АН10M, 08X18H10 (0,26% N) та гартований сплав 03X11H43M2T).

Досліджувані матеріали та їх характеристики

№ п/п	Матеріал, температура та час термічної обробки, середовище гартування	Структура	CrE	NiE	A _γ	σ _b , МПа	σ _{0,2} , МПа	δ, %	ψ, %	Літературне джерело
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	08X17E, T = 1053 К, вода	Ф	20,84	1,90	0,153	$\frac{460}{404}$	260	$\frac{37,0}{37,0}$	$\frac{66,0}{72,0}$	–
2	1X13(II)	Ф	14,60	4,40	0,349	$\frac{620}{573}$	390	$\frac{25,8}{27,0}$	$\frac{67,3}{71,0}$	[2]
3	1X13(I), T = 1273 К, 120 хв, п; T = 1033 К, 120 хв, п	Ф	14,60	4,40	0,349	$\frac{638}{701}$	429	$\frac{35,0}{29,0}$	$\frac{77,0}{77,0}$	[2]
4	X25H6M	Ф	29,00	8,00	0,439	$\frac{620}{676}$	380	$\frac{28,0}{32,0}$	$\frac{57,0}{62,0}$	–
5	1X17H2Ш, T = 1263 К, 120 хв, масло; T = 823 К, 120 хв, вода	М + Ф	18,20	6,60	0,549	$\frac{912}{840}$	707	$\frac{16,9}{19,0}$	$\frac{55,0}{48,0}$	[2]
6	2X13, T = 1323 К	М	13,20	7,30	0,553	$\frac{1000}{1025}$	850	$\frac{17,0}{18,0}$	$\frac{65,0}{59,0}$	[4]
7	2X13, T = 1323, 843 К	М	13,20	7,30	0,553	$\frac{1215}{1287}$	1080	$\frac{16,0}{13,0}$	$\frac{68,0}{63,0}$	[4]
8	15X16H2M, T = 1313, 933 К	М	17,80	6,80	0,566	$\frac{980}{962}$	800	$\frac{18,0}{17,0}$	$\frac{41,0}{55,0}$	[4]
9	15X16H2M, T = 1313, 843 К	М + К	17,80	17,80	0,566	$\frac{1200}{1063}$	900	$\frac{12,0}{18,0}$	$\frac{50,0}{54,0}$	[4]
10	1X12H2BMФ, T = 1293, 1033 К	М + К	14,85	14,85	0,635	$\frac{970}{1051}$	865	$\frac{18,5}{16,0}$	$\frac{59,5}{63,0}$	–
11	1X12H2BMФБА, T = 1293, 933 К	М + К + I	15,73	8,75	0,71	$\frac{1105}{1125}$	970	$\frac{17,5}{16,0}$	$\frac{59,0}{60,0}$	[4]

продовження табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
12	1X12H2BMФБА, $T = 1293, 873 \text{ K}$	M + K + I	15,73	8,75	0,71	$\frac{1340}{1244}$	1115	$\frac{14,5}{17,0}$	$\frac{64,5}{71,0}$	–
13	20X14H3M2Б, $T = 1383 \text{ K}$, масло; $T = 923 \text{ K}$, 120 хв, п	A + M + K	17,20	8,70	0,722	$\frac{1000}{961}$	790	$\frac{17,0}{17,0}$	$\frac{65,0}{60,0}$	–
14	02X11H11MФ, $T = 1223 \text{ K}$, 15 хв, 523 К	$A_{\min} + M + I_{\min}$	15,78	9,80	0,799	$\frac{1000}{1075}$	950	$\frac{17,0}{16,0}$	$\frac{75,0}{64,0}$	–
15	02X10H9T2M2	A + M	16,66	10,55	0,871	$\frac{1110}{1092}$	1010	$\frac{20,0}{18,0}$	$\frac{64,0}{68,0}$	[2]
16	03X12H9MT, $T = 1273 \text{ K}$, 60 хв, 823 К	A + M + I_{\min}	14,34	11,86	0,933	$\frac{1050}{1025}$	950	$\frac{17,0}{19,0}$	$\frac{60,0}{61,0}$	–
17	03X10H8K4MФД	A + M + I	12,05	13,29	0,961	$\frac{1100}{1104}$	1070	$\frac{18,0}{18,0}$	$\frac{65,0}{62,0}$	–
18	X5CrNi 18-12 (типу 05X19H10), $T = 1323 \text{ K}$, вода	A + M_d	18,80	12,10	1,004	$\frac{600}{520}$	200	$\frac{72,0}{83,0}$	$\frac{50,0}{53,0}$	[5]
19	1X18H10T, $T = 1423, 1023 \text{ K}$, 600 хв	A + M_d	19,20	12,70	1,051	$\frac{650}{638}$	250	$\frac{71,0}{72,0}$	$\frac{53,6}{65,0}$	[2]
20	1X18H10T, $T = 1323 \text{ K}$, вода	A + M_d	20,18	13,00	1,060	$\frac{660}{723}$	290	$\frac{67,0}{64,0}$	$\frac{62,0}{75,0}$	–
21	08X18H10 (0,022% N), $T = 1323$, вода	A + M_d	18,00	12,95	1,078	$\frac{590}{577}$	224	$\frac{78,0}{73,0}$	$\frac{74,0}{59,0}$	[6]
22	03X13AG19, $T = 1273 \text{ K}$, вода	A	14,70	13,95	1,110	$\frac{890}{848}$	381	$\frac{63,0}{66,0}$	$\frac{74,5}{68,0}$	–
23	X2CrNiMo 18-12 (типу 08X18H14M2), $T = 1323 \text{ K}$, вода	A	21,73	15,30	1,202	$\frac{600}{626}$	250	$\frac{68,0}{65,0}$	$\frac{83,0}{64,0}$	[5]

продовження табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
24	08X18H10 (0,26% N), $T = 1323$ К, вода	A	18,00	18,90	1,573	$\frac{785}{837}$	433	$\frac{56,0}{53,0}$	$\frac{70,0}{74,0}$	[6]
25	06X12Г20АН5, $T = 1273$ К, вода	A	15,50	20,25	1,642	$\frac{800}{809}$	420	$\frac{54,0}{55,0}$	$\frac{62,0}{70,0}$	–
26	00X19H23B2T, $T = 1323$ К, вода	A	23,22	22,80	1,700	$\frac{550}{526}$	220	$\frac{48,0}{50,0}$	$\frac{50,0}{51,0}$	–
27	06X27H16Г6А, $T = 1323$ К, вода	A	28,67	31,00	1,737	$\frac{810}{851}$	470	$\frac{52,0}{50,0}$	$\frac{66,0}{75,0}$	–
28	04X12H36Ю3ТВ, $T = 1023$ К, 120 хв; 923 К, 240 хв	A + I	30,78	37,95	1,862	$\frac{1110}{1115}$	820	$\frac{31,0}{31,0}$	$\frac{51,0}{50,0}$	–
29	03X21H32МЗБ, $T = 1613$ К, 120 хв	A	28,40	33,89	1,931	$\frac{640}{642}$	330	$\frac{41,0}{39,0}$	$\frac{70,0}{72,0}$	–
30	06X20H16АГ6, $T = 1323$ К, вода	A	21,2	24,30	1,938	$\frac{780}{750}$	410	$\frac{52,0}{54,0}$	$\frac{75,0}{62,0}$	–
31	06X14Г20АН10М, $T = 1273$ К, вода	A	19,35	29,60	2,445	$\frac{810}{767}$	460	$\frac{48,0}{44,0}$	$\frac{70,0}{50,0}$	–
32	03X11H43М2Т, $T = 1323$ К, 120 хв, ох. п; 1003 К, 900 хв; 963 К, 60 хв	A + I	28,34	44,09	2,520	$\frac{1180}{1153}$	770	$\frac{21,0}{41,0}$	$\frac{24,0}{34,0}$	–
33	04X11H43М2Т, п. № 32 + $T = 1473$ К, ох. до 1273 К, 120 хв, п	A + I _{min}	28,34	44,09	2,520	$\frac{815}{838}$	505	$\frac{37,0}{25,0}$	$\frac{38,0}{51,0}$	–
34	04X11H43М2Т, п. № 32 + $T = 1473$ К, ох. до 1273 К, 120 хв; 1023 К, 480 хв; 923 К, 480 хв, п	A + I	28,34	44,09	2,520	$\frac{1250}{1270}$	820	$\frac{29,0}{25,0}$	$\frac{49,0}{35,0}$	–

Примітки. 1. Над ризкою наведено експериментальні дані, під ризкою – розрахункові. 2. А – аустеніт; Ф – ферит; М – маргенсит; М_д – маргенсит деформації; К – карбіди; І – інтерметаліди; п – повітря; ох. – охолодження.

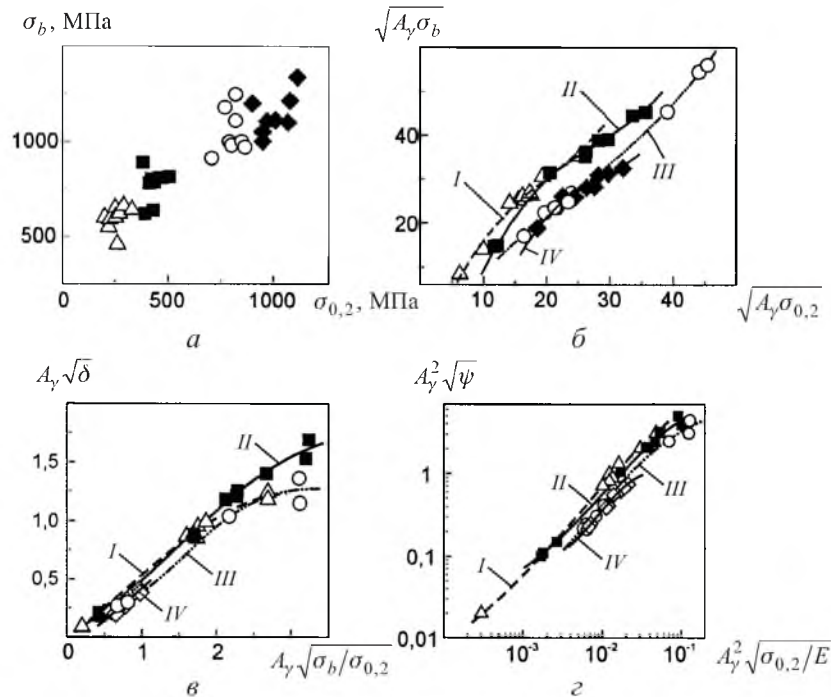


Рис. 2. Залежності між показниками міцності та пластичності сталей без врахування (а) і з врахуванням A_γ (б-г). (Цифри I-IV відповідають групі міцності.)

Матеріали в гетерогенному (багатофазному) стані ввійшли до таких двох груп високої міцності:

III група, $770 \text{ МПа} \leq \sigma_{0,2} \leq 890 \text{ МПа}$: економнолеговані корозійно-стійкі Fe-Ni-сплави з помірним (10...20%) вмістом зміцнюючих фаз (04X12Н36Ю3ТВ, 04X11Н43М2Т після старіння та перестарювання, 03X21Н32М3Б); сталі з карбідним та інтерметалідним зміцненням (2X13, 20X14Н3М2Б, 1X17Н2Ш, 1X12Н2ВМФ, 15X16Н2М);

IV група, $\sigma_{0,2} \geq 900 \text{ МПа}$: комплексно леговані сталі (2X13, 1X12Н2ВМФБА (дві термообробки)) та маловуглецеві мартенситно старіючі (02X11Н11МФ, 03X10Н8К4МФД, 03X12Н9МТ, 02X10Н9Т2М2).

Слід відзначити, що для першої групи матеріалів із найнижчою міцністю найбільші середні відхилення розрахункових значень σ_b від експериментальних складають 7,3%, для конструктивно працездатних сплавів наступних трьох груп міцності – менше 4-6% (табл. 2).

Аналіз експериментальних даних свідчить, що зі зростанням резерву міцності матеріалу збільшується і δ . Відомо, що коефіцієнт зміцнення визначають співвідношенням $\sigma_b/\sigma_{0,2}$ або $1 - \sigma_{0,2}/\sigma_b$ [1-3]. Тут для матеріалів кожної групи залежність між коефіцієнтом зміцнення та відносним подовженням апроксимували окремою кривою в координатах $A_\gamma \sqrt{\delta} - A_\gamma \sqrt{\sigma_b/\sigma_{0,2}}$ (рис. 2,в, табл. 2), між коефіцієнтом зміцнення та відносним звуженням – в координатах $A_\gamma^2 \sqrt{\psi} - A_\gamma^2 \sqrt{\sigma_{0,2}/E}$ (рис. 2,г, табл. 2). Модуль нормальної пружності $E = 2 \cdot 10^5 \text{ МПа}$.

Т а б л и ц я 2

Результати апроксимації залежностей між показниками міцності та пластичності корозійно-стійких сталей, що враховують A_γ

Група міцності	Параметр	Рівняння апроксимації	Коефіцієнт кореляції R	Середня похибка, %
	σ_b	$y = \sqrt{A_\gamma \sigma_b}; x = \sqrt{A_\gamma \sigma_{0,2}}$		
I		$y = -7,9091 + 2,7649x - 0,0419x^2$	0,9925	7,3
II		$y = -36,82036 + 6,3743x - 0,20032x^2 + 0,00243x^3$	0,9974	5,7
III		$y = -10,50464 + 2,29781x - 0,0466x^2 + 6,27 \cdot 10^{-4}x^3$	0,9918	3,6
IV		$y = -93,33867 + 11,77788x - 0,39621x^2 + 0,00473x^3$	0,9818	4,8
	δ	$y = A_\gamma \sqrt{\delta}; x = A_\gamma \sqrt{\sigma_b / \sigma_{0,2}}$ (σ_b – розрахункове)		
I		$y = 0,0016 + 0,4216x + 0,1507x^2 - 0,0523x^3$	0,9955	5,4
II		$y = 0,0067 + 0,345x + 0,1718x^2 - 0,0385x^3$	0,9974	8,7
III		$y = 0,223 - 0,2666x + 0,5366x^2 - 0,1106x^3$	0,9938	8,3
IV		$y = 0,0015 + 0,2249x + 0,1917x^2$	0,9582	14,7
	ψ	$y = A_\gamma^2 \sqrt{\psi}; x = A_\gamma^2 \sqrt{\sigma_{0,2} / E}$		
I		$y = 0,3233 - 1,19321 \lg x - 0,99506(\lg x)^2 - 0,14006(\lg x)^3$	0,9986	12,8
II		$y = 0,55021 - 0,917351 \lg x - 0,97544(\lg x)^2 - 0,16003(\lg x)^3$	0,9984	13,2
III		$y = 0,8529 - 0,06381 \lg x - 0,47625(\lg x)^2 - 0,06397(\lg x)^3$	0,9965	17,8
IV		$y = -23,0781 - 37,37831 \lg x - 19,8295(\lg x)^2 - 3,39705(\lg x)^3$	0,9960	6,7

Малоциклова утома. Плоскі зразки товщиною 2-3 мм зі сталей №№ 1, 13, 14, 16, 17, 25–28, 32–34 (табл. 1) піддавали малоциклового навантаженню у повітрі віднульовим чистим згином на установці ІІІ-2ВТД за методикою [7]. Частота навантажень складала 0,5 Гц, температура – 293 К. Амплітуда циклічної деформації ε становила 0,8; 1,2; 1,6%, база випробувань – $5 \cdot 10^2 \dots 5 \cdot 10^4$ цикл. Вплив термообробки на малоциклову довговічність вивчали на сталі 03X11H43M2T. Результати випробувань представлено в табл. 3.

Як правило, малоциклову міцність за жорсткого навантаження розраховують за рівняннями Коффіна–Менсона – $\varepsilon N^k = C$. У різних авторів значення k і C змінюються в таких межах: $k = 0,4 \dots 0,6$; $C = (0,5 \dots 1,2)e_p$ (e_p – істинне подовження під час руйнування) або $C = 1/2 \ln[1/(1 - \psi)]$ [3, 5]. Розбіжність між експериментальним та розрахованим числом циклів до руйнування за цими рівняннями сягає 5–10 разів. Порівняння (табл. 1 та 3) зміни деформаційних характеристик δ , ψ та малоциклової довговічності матеріалів N показало, що з показників статичного навантаження найбільш чутливим є відносне звуження ψ . Втім, ця відповідність змін обмежується групами матеріалів із близьким фазно-структурним станом. Для матеріалів з

Т а б л и ц я 3

Експериментальні та розрахункові значення малоциклової довговічності корозійно-стійких сталей

№ п/п матеріалу в табл. 1	Малоциклова довговічність N (цикл) за амплітуди деформації ε (%)		
	0,8	1,2	1,6
1	–	–	$\frac{800}{800}$ (925)
13	$\frac{9000}{9000}$ (7100)	$\frac{3100}{3100}$ (2100)	$\frac{1000}{1000}$ (890)
14	$\frac{15800}{15800}$ (12000)	$\frac{4200}{4200}$ (3560)	$\frac{1300}{1300}$ (1500)
16	$\frac{26300}{26300}$ (15330)	$\frac{5300}{5300}$ (4540)	$\frac{2100}{2100}$ (1920)
17	$\frac{17000}{16250}$ (14950)	$\frac{4300}{4470}$ (4430)	$\frac{1700}{1470}$ (1870)
20	$\frac{12000}{11970}$ (13080)	$\frac{3000}{3000}$ (3870)	$\frac{1800}{2015}$ (1630)
25	$\frac{27000}{28410}$ (22290)	$\frac{8000}{7870}$ (6600)	$\frac{2600}{2560}$ (2790)
26	$\frac{20500}{23010}$ (19080)	$\frac{5700}{6350}$ (5650)	$\frac{1850}{2110}$ (2380)
27	$\frac{28000}{31970}$ (25300)	$\frac{8700}{8420}$ (7495)	$\frac{4000}{3550}$ (3160)
28	$\frac{28000}{24740}$ (20900)	$\frac{6300}{6510}$ (6190)	$\frac{2750}{2760}$ (2610)
32	$\frac{27500}{27500}$ (27945)	$\frac{4900}{4900}$ (8200)	$\frac{2500}{2510}$ (3490)
33	$\frac{21700}{20820}$ (21520)	$\frac{4700}{4170}$ (6370)	$\frac{2660}{2620}$ (2690)
34	$\frac{11600}{12180}$ (13160)	$\frac{2800}{2885}$ (3900)	$\frac{1590}{1660}$ (1645)

Примітка. Над рискою наведено експериментальні дані, під рискою – розрахунок за формулами (1)–(3), (5)–(7) із табл. 4, в дужках – розрахунок за формулами (4) і (8) із табл. 4.

однаковим ψ , але з різною структурою відмінність у довговічності може бути суттєвою. Наприклад, для феритної 08X17T та аустенітної 06X26H16AG6 сталей маємо $\psi = 66\%$, а довговічність за $\varepsilon = 1,6\%$ становить 800 та 4000 цикл відповідно, тобто суто деформаційна постановка для корозійно-стійких сталей дає значні похибки. Для кількісного врахування фазно-структурного стану матеріалу використовували параметр A_γ . Аналітичний вираз має загальний вигляд $A_\gamma^m N^n = f(A_\gamma^k \psi^p)$. Конкретний розв'язок знаходили за вищенаведеним алгоритмом для кожної амплітуди циклічної деформації. Залежність $A_\gamma^2 \sqrt{N} - A_\gamma^2 \sqrt{\psi}$ для різних амплітуд деформацій показана на рис. 3. Мінімізуючи розбіжність між експериментальними та розрахунковими

даними, поведінку перехідних структур з $A_\gamma < 1$ та аустенітних матеріалів з $A_\gamma \geq 1$ описували окремими залежностями (табл. 4). Для визначення зв'язку між амплітудою циклічної деформації та довговічністю побудовано графік у координатах $Y = (A_\gamma \varepsilon)^{1/2} \sqrt{N}$, $X = A_\gamma^2 \sqrt{\psi}$ (рис. 4). Кожна залежність в табл. 4 характеризує зв'язок між властивостями за статичного і утомного навантажень у широкому діапазоні зміни міцності ($200 \text{ МПа} \leq \sigma_{0,2} \leq 1000 \text{ МПа}$). Розраховані за формулами (1)–(3), (5)–(7), (4) і (8) (табл. 4) значення довговічності подано в табл. 3.

Т а б л и ц я 4

Результати апроксимації залежностей між відносним подовженням та малоцикловою довговічністю корозійно-стійких сталей, що враховують A_γ

A_γ	№ формули	Параметр	Рівняння апроксимації	Коефіцієнт кореляції R	Середня похибка, %
< 1		N	$y = A_\gamma^2 \sqrt{N}; x = A_\gamma^2 \sqrt{\psi}$		
	(1)		$\varepsilon = 1,6\%:$ $y = -1,1369 + 99,659x - 232,16x^2 + 238,11x^3$	1,0000	0
	(2)		$\varepsilon = 1,2\%: y = 30,175 - 58,645x + 143,66x^2$	1,0000	0
	(3)		$\varepsilon = 0,8\%: y = 68,928 - 221,33x + 442,1x^2$	1,0000	0
			$y = (A_\gamma \varepsilon)^{3/2} \sqrt{N}; x = A_\gamma^2 \sqrt{\psi}$		
	(4)		$y = 0,0023 + 0,0709x + 0,0494x^2$	0,9960	20,0
≥ 1			$y = A_\gamma^2 \sqrt{N}; x = A_\gamma^2 \sqrt{\psi}$		
	(5)		$\varepsilon = 1,6\%:$ $y = 121,6 - 187,15x + 127,69x^2 - 17,01x^3$	0,9985	9,6
	(6)		$\varepsilon = 1,2\%: y = -74,699 + 176,23x - 13,37x^2$	0,9990	4,2
	(7)		$\varepsilon = 0,8\%: y = -91,316 + 256,92x + 0,1217x^2$	0,9982	6,3
			$y = (A_\gamma \varepsilon)^{3/2} \sqrt{N}; x = A_\gamma^2 \sqrt{\psi}$		
	(8)		$y = -0,0003 + 0,1046x + 0,0007x^2$	0,9851	13,9

Аналіз результатів досліджень. Установлено, що використання одного показника A_γ γ -фазової активності елементів хімічного складу є достатнім для отримання кореляцій з $R > 0,95$ між механічними властивостями сплавів у діапазоні $200 \text{ МПа} \leq \sigma_{0,2} \leq 1115 \text{ МПа}$. Залежно від термічної обробки матеріали можуть знаходитися в складі різних груп міцності. Зокрема, в загартованому стані сплав 04X11N43M2T – у другій групі, після старіння – в третій. Термообробка змінює структуру, після чого сталі 15X16N2M, 2X13, 1X12NB2MФ з третьої групи переходять до четвертої. Аналогічно впливає і легування. Сталь 08X18N10 з 0,022% N відноситься до першої групи міцності, з 0,26% N – до другої. Переміщення матеріалів із групи у групу супровод-

жується відповідною зміною залежностей між властивостями згідно з рівняннями, наведеними в табл. 2.

Введення параметра A_γ дало змогу отримати залежності між показниками статичного і малоциклового навантажень, за якими середня розбіжність між фактичними і розрахованими даними не перебільшує 9,6% (рівняння (1)–(3) та (5)–(7), табл. 4) та 13,9...20,0% (рівняння (4) і (8), табл. 4). Зростання точності прогнозу завдяки врахуванню фазно-структурного стану матеріалів у перспективі дозволить зменшувати коефіцієнти запасу при обґрунтуванні малоциклової міцності і таким чином понижувати металоємність та вартість відповідальних виробів.

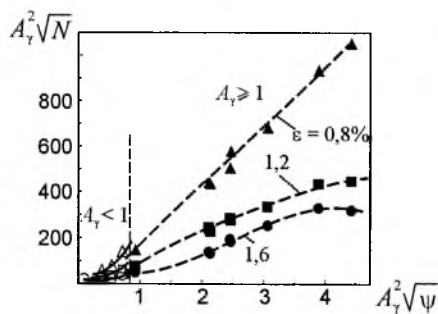


Рис. 3

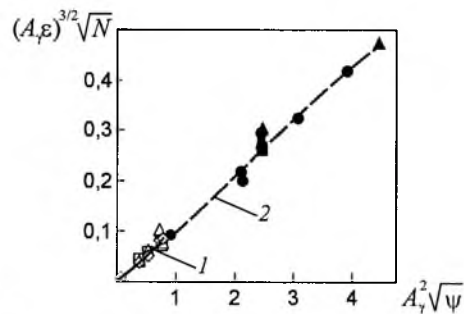


Рис. 4

Рис. 3. Залежність між довговічністю N та відносним подовженням ψ із врахуванням A_γ для амплітуд циклічної деформації ε .

Рис. 4. Зв'язок між деформацією ε та довговічністю N : 1 – $A_\gamma < 1$; 2 – $A_\gamma \geq 1$.

Загалом, за значеннями m та k у виразах $A_\gamma^m a^n = f(A_\gamma^k b^p)$ можна відслідкувати вплив структурного фактора на зв'язок між силовими, деформаційними та утомними характеристиками, зокрема при оцінці міцності (σ_b , $\sigma_{0,2}$) маємо $m, k = 0,5$, відносного подовження (δ) – $m, k = 1$, звуження (ψ) і довговічності (N) – $m, k = 2$.

Результат може бути придатним для неруйнівного контролю матеріалів, які змінюють властивості під час експлуатації. Дана методика на підставі лише однієї характеристики міцності (наприклад, вимірюється твердість, а по ній визначається σ_b) дає змогу розраховувати решту механічних властивостей на ділянках гетерогенності без суттєвих порушень цілісності металу.

Цей підхід може бути корисним для підвищення надійності оцінок ресурсу конструкційних матеріалів у широкому спектрі умов експлуатації, де роль структурного чинника визначальна: за різних видів навантаження, температур, рідких та газових середовищ, у тому числі високих тисків, за наявності концентраторів напружень, тощо.

Висновки

1. Запропоновано кількісно враховувати фазно-структурний стан корозійно-стійких хромистих та хромонікелевих сталей за допомогою коефіцієнта стабільності аустеніту A_γ .

2. Використання коефіцієнта A_γ дозволяє за експериментальними значеннями $\sigma_{0,2}$ в інтервалі $200 \text{ МПа} \leq \sigma_{0,2} \leq 1115 \text{ МПа}$ і хімічним складом сталей визначати величини σ_b , δ , ψ , а за хімічним складом та відносним звуженням – малоциклову довговічність, причому матеріали з $A_\gamma < 1$ (сталі перехідного класу) і $A_\gamma \geq 1$ (аустенітні сталі) мають власні залежності.

Резюме

Использование коэффициента стабильности аустенита позволяет количественно оценивать фазоструктурное состояние коррозионно-стойких сталей по химическому составу. Коэффициент стабильности аустенита рассчитывают на основании хромовых и никелевых эквивалентов. С помощью коэффициента стабильности аустенита получена корреляция между механическими свойствами при статическом нагружении. Предложено малоцикловую долговечность определять по химическому составу и относительному сужению.

1. Пикеринг Ф. Б. Физическое металловедение и разработка сталей / Пер. с англ. – М.: Металлургия, 1982. – 183 с.
2. Троценко В. Т. Деформирование и разрушение металлов при многоцикловом нагружении. – Киев: Наук. думка, 1981. – 344 с.
3. Махутов Н. А., Воробьев А. З., Гаденин М. М. и др. Прочность конструкций при малоцикловом нагружении. – М.: Наука, 1983. – 268 с.
4. Каличак Т. Н. Исследование некоторых физико-механических и электрохимических свойств мартенситных нержавеющей сталей: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Киев, 1971. – 21 с.
5. Даль В., Бельхе П. Диаграмма деформирования // Статическая прочность и механика разрушения стали / Под ред. В. Даля, В. Антона. – М.: Металлургия, 1986. – С. 51 – 133.
6. Приданцев М. Е., Талов Н. П., Левин Ф. Л. Высокопрочные аустенитные стали. – М.: Металлургия, 1969. – 247 с.
7. Ткачев В. И., Холодный В. И., Левина И. Н. Работоспособность сталей и сплавов в среде водорода. – Львов: Вертикаль, 1999. – 255 с.

Поступила 01. 03. 2006