

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ЗАЛЕЖНОСТІ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВІД ХІМІЧНОГО СКЛАДУ СТАЛЕЙ ДЛЯ ЕШЗ

С.В. Єгорова, О.В. Махненко, Г.Ю. Саприкіна, Д.П. Синьок

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Розглянута можливість побудови математичних моделей залежності механічних властивостей кремній-марганцевих сталей, що мають високу стійкість до крихкого руйнування в зоні термічного впливу, призначених для електрошлакового зварювання, а також ділянки перегріву в залежності від хімічного складу. Дані стосовно механічних властивостей цих сталей були отримані в результаті дослідження впливу додаткового легування (мікролегування) кремній-марганцевої сталі марганцем, хромом, ванадієм, бором, церієм, цирконієм на стійкість до перегріву при електрошлаковому зварюванні. Для побудови математичних моделей було використано метод множинної лінійної регресії. Побудовано математичні моделі для комплексу механічних властивостей основного металу: ударна в'язкість для температур (+20, -40, -60, -70 °C), межа плинності, межа міцності, відносне подовження і відносне звуження. Для ділянки перегріву при електрошлаковому зварюванні побудовані математичні моделі для ударної в'язкості (KCU і KCV) для температур: +20, -60, -70 °C. Проведена первинна валідація побудованих моделей. Бібліогр. 9, табл. 12, рис. 2.

Ключові слова: кремній-марганцеві сталі, хімічний склад, мікролегування, механічні властивості, математичні моделі, електрошлакове зварювання

В результаті проведення в ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України досліджень про вплив хімічного складу на механічні властивості кремній-марганцевих сталей, виплавлених методом індукційного переплаву, призначених для електрошлакового зварювання (ЕШЗ), які мають високу стійкість до крихкого руйнування [1], була отримана експериментальна інформація про хімічний склад і механічні властивості основного матеріалу (табл. 1, 2) та ділянки перегріву (ЗТВ) (табл. 3) для 55 дослідних плавок низьколегованих сталей. З використанням цієї інформації побудовані математичні моделі для прогнозування механічних властивостей основного металу і металу зони перегріву при ЕШЗ в залежності від хімічного складу сталей. Отримані моделі можуть знайти ефективне застосування при розробці нових кремній-марганцевих сталей для визначення оптимального легування з метою отримання заданих механічних властивостей і необхідного рівня стійкості до крихкого руйнування в ЗТВ зварних з'єднань, виконаних із застосуванням ЕШЗ.

Загальні відомості стосовно побудови регресійних моделей. Для побудови математичних моделей за наявними експериментальними даними щодо механічних властивостей і хімічного складу дослідних сталей застосовувався метод множинної лінійної регресії, призначений для моделювання залежності між однією залежною змінною і декількома незалежними змінними [2, 3]. Такий зв'язок теоретично може бути описаний лінійною залежністю виду:

$$Y = b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_k x_k + U,$$

де Y – залежна змінна – регресант; U – випадкова складова моделі; x_k – незалежні змінні – регресори.

Коефіцієнти моделі множинної лінійної регресії знаходять за допомогою методу найменших квадратів.

Метод найменших квадратів [4] дозволяє знайти такі значення коефіцієнтів, для яких сума квадратів відхилень буде мінімальною. Для визначення коефіцієнтів розв'язується система нормальних рівнянь:

$$\begin{cases} nb_0 + b_1 \sum x_1 + \dots + b_p \sum x_p = \sum y \\ b_0 \sum x_1 + b_1 \sum x_1^2 + \dots + b_p \sum x_1 x_p = \sum x_1 y \\ \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \\ b_0 \sum x_p + b_1 \sum x_1 x_p + \dots + b_p \sum x_p x_p = \sum x_p y. \end{cases}$$

Розв'язок системи можна отримати, наприклад, методом Крамера:

$$b_0 = \frac{\Delta b_0}{\Delta}, \quad b_1 = \frac{\Delta b_1}{\Delta}, \quad \dots, \quad b_p = \frac{\Delta b_p}{\Delta}.$$

Визначник системи записується наступним чином:

$$\Delta = \begin{vmatrix} n & \sum x_1 & \sum x_p \\ \sum x_1 & \sum x_1^2 & \sum x_1 x_p \\ \sum x_p & \sum x_1 x_p & \sum x_p x_p \end{vmatrix}.$$

Дані спостережень та коефіцієнти рівняння множинної регресії можна подати у вигляді наступних матриць:

Таблиця 1. Хімічний склад дослідних сталей, мас. %

Номер п/п	Система легування	Номер експериментальної плавки	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	V	Al	Ce	B	Zr
1	Mn-Si-Al	20	0,069	1,550	0,530	0,031	0,012	0,150	0,630	-	0,100	0,050	-	-
2	Mn-Si-Ce-Al	25	0,065	1,550	0,770	0,021	0,012	0,200	0,100	-	0,130	0,033	-	-
3	Mn-Si-Al-B	26	0,060	1,350	0,600	0,024	0,012	0,160	0,300	-	0,200	-	0,006	-
4	Mn-Si-Al-B	33	0,091	1,580	0,650	0,021	0,013	0,170	0,140	-	0,330	-	0,005	-
5	Mn-Si-Al	37	0,038	2,350	0,320	0,028	0,040	-	-	-	0,200	-	-	-
6	Mn-Si-Ce-Al	38	0,065	2,300	0,190	0,018	0,012	0,290	0,200	-	0,067	0,075	-	-
7	Mn-Si-Al-Ce-B	82	0,120	2,700	0,500	-	-	-	-	-	0,100	0,065	0,008	-
8	Mn-Si-Ce-Al-Cr-Ni	99	0,080	0,315	-	-	1,000	1,100	-	0,110	0,290	-	-	-
9	Mn-Si-Al-Ce-B	100	0,062	1,860	0,280	0,021	0,012	0,450	0,350	-	0,110	0,029	0,005	-
10	Mn-Si-Al-Ce-Zr-B	133	0,053	2,300	0,520	0,017	0,009	0,080	0,100	-	0,185	0,024	0,004	0,017
11	Mn-Si-Ce-Al-Zr-V-P-Cr	152	0,076	1,260	0,038	0,068	0,009	1,450	0,320	0,035	0,070	0,069	0,003	0,015
12	Mn-Si-Al-Ce-Zr-B-V	153	0,082	1,950	0,580	0,012	0,110	0,320	0,185	0,275	0,160	0,140	0,022	0,200
13	Mn-Si-Al-Ce-Zr-B	156	0,069	2,400	0,550	0,018	0,009	0,060	0,180	-	0,240	0,093	0,003	0,040
14	Mn-Si-Ce-Al-Zr-V-P-Cr	157	0,056	1,600	0,400	0,002	0,009	1,400	0,130	0,032	0,100	0,064	0,004	0,035
15	Mn-Si-Al-Ce-Zr-B-V	163	0,072	1,500	0,500	0,020	0,012	0,080	0,180	0,210	0,140	0,004	0,003	0,075
16	Mn-Si-Al-Ce-Zr	164	0,058	2,400	0,550	0,083	0,015	0,090	0,165	-	0,125	0,100	-	0,086
17	Mn-Si-Al-Ce-B-V	165	0,058	2,500	0,560	0,020	0,013	0,095	0,110	0,200	0,089	0,090	0,005	-
18	Mn-Si-Al-Ce-Zr-B-V	167	0,073	2,350	0,820	0,019	0,018	0,083	0,100	0,130	0,190	0,090	0,004	0,100
19	Mn-Si-Ce-Al-Zr-B-Cr	177	0,068	2,250	0,630	0,014	0,011	2,850	0,100	-	0,220	0,100	0,003	0,045
20	Mn-Si-Ce-Al-Zr-V-P-Cr	203	0,051	1,600	0,050	0,018	0,011	1,500	0,100	0,022	0,110	0,066	0,004	0,020
21	Mn-Si-Ce-Al-Cr	205	0,080	1,280	0,690	0,015	0,010	2,700	0,100	-	0,290	0,072	-	-
22	Mn-Si-Ai-Ce-B	206	0,045	1,280	0,210	0,008	0,013	0,500	-	-	0,038	0,040	0,003	-
23	Mn-Si-Al-Ce-B-V	207	0,052	1,600	0,820	0,016	0,013	0,190	-	0,210	0,075	0,110	0,006	-
24	Mn-Si	410	0,120	1,900	0,380	-	-	-	-	-	-	-	-	-
25	Mn-Si	411	0,130	1,180	0,140	-	-	-	-	-	-	-	-	-
26	Mn-Si	412	0,100	1,400	0,430	-	-	-	-	-	-	-	-	-
27	Mn-Si	413	0,120	2,600	0,570	-	-	-	-	-	-	-	-	-
28	Mn-Si-Al-Ce-V	432	0,080	1,300	0,440	-	-	-	0,100	0,200	0,100	0,160	-	-
29	Mn-Si-Ce-Al-Zr-Cr	433	0,085	1,400	0,800	-	-	2,200	-	-	0,065	0,018	-	0,060
30	Mn-Si-Ce-Al-V-Cr	434	0,085	1,350	0,650	-	-	2,400	0,075	0,051	0,045	0,040	-	-
31	Mn-Si-Ce-Al-Zr-B-Cr	435	0,080	1,420	0,680	-	-	2,350	0,080	-	0,150	0,130	0,004	0,023
32	Mn-Si-Ce-Al-Zr-V-P-Cr	436	0,080	2,100	0,550	-	-	2,600	0,070	0,010	0,185	0,075	0,008	0,020
33	Mn-Si-Ce-Al-Zr-V-B-Cr	437	0,083	2,000	0,490	-	-	2,300	0,070	0,190	0,110	0,085	0,006	-

Продовження. Таблиця 1.

34	Mn-Si-Ce-Al-Zr-V-Cr	438	0,115	2,500	0,670	-	-	2,900	0,100	0,275	0,115	0,080	-	0,040
35	Mn-Si-Al-Ce-V	458	0,080	1,100	0,220	-	-	0,450	0,085	0,010	0,160	0,035	-	-
36	Mn-Si-Al-Ce-Zr-V	459	0,090	2,350	0,760	-	-	0,080	0,140	0,050	0,087	0,150	-	0,017
37	Mn-Si-Ce-Al-Zr-V-Cr	460	0,070	1,700	0,600	-	-	2,600	0,130	0,155	0,095	0,300	-	0,030
38	Mn-Si-Ce-Al-Zr-Cr	505	0,075	1,850	0,770	-	-	1,720	0,170	-	0,130	0,200	-	0,030
39	Mn-Si-Ce-Al-Zr-V-Cr	506	0,080	1,900	0,490	-	-	1,750	-	0,180	0,080	0,110	-	0,010
40	Mn-Si-Ce-Al-Zr-V-B-Cr	507	0,100	1,850	0,680	-	-	1,400	-	0,032	0,070	0,080	0,004	-
41	Mn-Si-Ce-Al-Mo	530	0,050	1,900	0,030	0,030	0,011	0,044	0,070	-	0,068	0,060	-	-
42	Mn-Si-Ce-Al	531	0,065	2,050	0,600	0,014	0,015	0,053	0,110	-	0,063	0,085	-	-
43	Mn-Si	597	0,200	1,100	0,240	-	-	0,140	-	-	-	-	-	-
44	Mn-Si	598	0,190	1,000	0,120	-	-	0,160	-	-	-	-	-	-
45	Mn-Si-Ce-Al-Cr	718	0,090	2,300	0,450	-	-	1,100	-	-	0,040	-	-	-
46	Mn-Si-Ce-Al-Cr	727	0,080	1,200	0,500	-	-	0,650	0,120	-	0,085	-	-	-
47	Mn-Si-Ce-B	728	0,080	2,050	0,600	-	-	0,240	0,090	-	0,042	0,009	0,005	-
48	Mn-Si-Ce-Al-Cr	881	0,063	1,600	0,630	-	-	0,440	0,190	-	0,048	-	-	-
49	Mn-Si-Ce-B	882	0,080	1,750	0,640	-	-	0,160	0,100	-	0,033	0,029	0,006	-
50	Mn-Si-Ce-Al	883	0,065	1,650	0,680	-	-	0,100	0,165	-	0,050	0,085	-	-
51	Mn-Si-Ce-B	894	0,075	1,600	0,650	-	-	0,165	0,145	-	0,032	0,040	0,005	-
52	Mn-Si-Ce-Al	895	0,089	2,250	0,250	-	-	0,080	-	-	0,034	-	-	-
53	Mn-Si-Ce-B	896	0,070	1,230	0,540	-	-	0,040	-	-	0,010	0,046	0,003	-
54	Mn-Si-Ce	127-2	0,120	2,800	0,300	-	-	-	-	-	-	0,060	-	-

Таблиця 2. Механічні властивості дослідних сталей (основний метал)

Номер п/п	Система легування	Номер плавки	σ_r , МПа	σ_B , МПа	δ , %	ξ , %	Ударна в'язкість (KCU), Дж/см ²			
							+20 °C	-40 °C	-60 °C	-70 °C
1	Mn-Si-Al	20	314	444	32,8	65,4	131,5	92,5	89,0	73,5
2	Mn-Si-Ce-Al	25	298	434	34,5	75,0	35,0	343,0	298,0	270,5
3	Mn-Si-Al-B	26	302	447	27,8	75,1	-	44,0	31,0	-
4	Mn-Si-Al-B	33	258	404	36,6	75,0	172,0	130,0	114,5	90,0
5	Mn-Si-Al	37	258	430	39,3	60,9	116,0	37,0	47,5	53,5
6	Mn-Si-Ce-Al	38	270	411	38,5	78,2	236,0	147,0	159,5	140,5
7	Mn-Si-Al-Ce-B	82	441	561	27,3	71,6	-	132,5	125,0	116,0
8	Mn-Si-Ce-Al-Cr-Ni	99	413	523	30,0	71,5	237,0	147,5	121,5	117,0
9	Mn-Si-Al-Ce-B	100	284	410	36,2	79,0	225,5	116,0	156,0	75,0
10	Mn-Si-Al-Ce-Zr-B	133	378	498	31,8	78,2	298,0	184,5	211,5	208,5
11	Mn-Si-Ce-Al-Zr-V-P-Cr	152	488	616	24,2	66,0	220,0	192,0	70,0	11,0
12	Mn-Si-Al-Ce-Zr-B-V	153	760	820	18,6	55,6	-	-	5,5	6,5
13	Mn-Si-Al-Ce-Zr-B	156	417	544	31,3	73,3	150,0	72,0	-	147,0
14	Mn-Si-Ce-Al-Zr-V-P-Cr	157	394	484	28,5	66,9	-	196,0	8,0	7,0
15	Mn-Si-Al-Ce-Zr-B-V	163	378	519	26,9	75,0	202,0	8,0	4,5	4,5
16	Mn-Si-Al-Ce-Zr	164	503	592	18,8	51,0	68,0	9,5	6,0	6,0
17	Mn-Si-Al-Ce-B-V	165	419	535	24,2	66,0	75,0	14,5	-	9,0
18	Mn-Si-Al-Ce-Zr-B-V	167	407	566	-	-	-	16,0	6,0	-
19	Mn-Si-Ce-Al-Zr-B-Cr	177	399	517	18,8	66,0	-	6,0	4,5	-
20	Mn-Si-Ce-Al-Zr-V-P-Cr	203	259	394	-	-	212,0	189,5	167,0	43,0

Продовження. Таблиця 2.

21	Mn-Si-Ce-Al-Cr	205	389	495	27,2	75,0	97,5	29,0	10,5	6,0
22	Mn-Si-Ai-Ce-B	206	268	415	36,5	73,5	246,7	97,0	8,0	5,5
23	Mn-Si-Al-Ce-B-V	207	340	478	32,9	75,0	218,5	112,5	73,5	5,5
24	Mn-Si	410	380	516	32,0	70,8	350,5	196,5	105,0	-
25	Mn-Si	411	303	460	30,8	69,5	197,5	15,0	6,500	-
26	Mn-Si	412	336	432	28,8	70,7	353,0	-	179,5	10,5
27	Mn-Si	413	403	536	28,5	72,1	214,5	-	144,0	162,0
28	Mn-Si-Al-Ce-V	432	293	447	34,2	77,4	325,0	256,0	244,0	252,5
29	Mn-Si-Ce-Al-Zr-Cr	433	376	570	30,0	70,2	-	58,5	7,5	-
30	Mn-Si-Ce-Al-V-Cr	434	424	590	28,5	70,2	121,0	25,0	-	-
31	Mn-Si-Ce-Al-Zr-B-Cr	435	304	425	24,7	44,9	250,0	119,0	2,5	-
32	Mn-Si-Ce-Al-Zr-V-P-Cr	436	633	690	20,0	67,5	63,5	7,0	-	-
33	Mn-Si-Ce-Al-Zr-V-B-Cr	437	507	625	23,8	75,0	5,0	3,5	-	-
34	Mn-Si-Ce-Al-Zr-V-Cr	438	607	714	21,1	66,0	5,5	4,0	-	-
35	Mn-Si-Al-Ce-V	458	602	684	22,8	70,7	3,0	3,0	-	-
36	Mn-Si-Al-Ce-Zr-V	459	455	572	21,5	62,7	75,0	32,0	-	-
37	Mn-Si-Ce-Al-Zr-V-Cr	460	454	577	27,2	70,5	141,0	15,0	-	-
38	Mn-Si-Ce-Al-Zr-Cr	505	752	669	12,8	37,2	58,5	29,5	-	-
39	Mn-Si-Ce-Al-Zr-V-Cr	506	735	832	18,5	-	34,0	7,0	-	-
40	Mn-Si-Ce-Al-Zr-V-B-Cr	507	401	575	29,5	75,0	75,0	44,5	-	-
41	Mn-Si-Ce-Al-Mo	530	298	443	33,7	77,5	350,0	324,0	-	254,0
42	Mn-Si-Ce-Al	531	323	500	34,9	75,0	295,5	243,0	-	200,0
43	Mn-Si	597	400	487	31,0	68,5	136,0	-	-	-
44	Mn-Si	598	390	492	31,0	38,5	142,5	-	-	-
45	Mn-Si-Ce-Al-Cr	718	386	561	26,2	73,3	-	142,5	126,0	108,5
46	Mn-Si-Ce-Al-Cr	727	245	406	39,2	79,8	-	101,5	-	12,9
47	Mn-Si-Ce-B	728	288	431	36,8	80,5	-	188,2	183,3	33,2
48	Mn-Si-Ce-Al-Cr	881	318	469	-	-	-	274,0	-	224,5
49	Mn-Si-Ce-B	882	385	517	28,7	64,9	-	195,0	-	204,0
50	Mn-Si-Ce-Al	883	-	-	-	-	-	269,5	133,0	98,0
51	Mn-Si-Ce-B	894	318	493	30,7	68,9	-	297,5	-	184,5
52	Mn-Si-Ce-Al	895	319	491	30,3	66,0	-	223,0	-	191,0
53	Mn-Si-Ce-B	896	305	488	26,9	64,9	-	268,0	-	242,5
54	Mn-Si-Ce	127-2	500	637	25,0	69,8	-	131,0	100,0	108,5
53	Mn-Si-Ce-B	896	305	488	26,9	64,9	0,0	268,0	0,0	242,5
54	Mn-Si-Ce	127-2	500	637	25,0	69,8	0,0	131,0	100,0	108,5

Таблиця 3. Механічні властивості ділянки перегріву

Номер п/п	Система легування	Номер плавки	Ударна в'язкість (KCU), Дж/см ²			Ударна в'язкість (KCV), Дж/см ²		
			+20 °C	-40 °C	-70 °C	+20 °C	-40 °C	-70 °C
1	Mn-Si-Al	20	-	-	142,0	53,5	11,0	-
2	Mn-Si-Ce-Al	25	165,5	-	-	206,0	118,5	41,0
3	Mn-Si-Al-B	26	183,0	-	99,0	-	-	90,5
4	Mn-Si-Al-B	33	191,5	-	-	111,0	73,5	17,5
5	Mn-Si-Al	37	134,5	-	-	81,0	52,5	29,5
6	Mn-Si-Ce-Al	38	187,5	-	-	56,5	66,0	22,5
7	Mn-Si-Al-Ce-B	82	-	121,0	-	108,5	108,5	68,5
8	Mn-Si-Ce-Al-Cr-Ni	99	-	-	-	128,0	116,5	109,5
9	Mn-Si-Al-Ce-B	100	106,5	-	83,5	62,5	66,0	32,5
10	Mn-Si-Al-Ce-Zr-B	133	-	-	-	160,5	148,5	6,5
11	Mn-Si-Ce-Al-Zr-V-P-Cr	152	-	127,5	-	6,0	-	4,0
12	Mn-Si-Al-Ce-Zr-B-V	153	-	8,0	-	405,0	-	4,0
13	Mn-Si-Al-Ce-Zr-B	156	-	167,0	-	5,0	-	5,5
14	Mn-Si-Ce-Al-Zr-V-P-Cr	157	-	19,5	-	5,0	-	4,0
15	Mn-Si-Al-Ce-Zr-B-V	163	-	6,0	-	-	-	4,0
16	Mn-Si-Al-Ce-Zr	164	-	5,0	-	4,5	-	4,0
17	Mn-Si-Al-Ce-B-V	165	-	63,5	-	-	14,5	-

Продовження. Таблиця 3.

18	Mn-Si-Al-Ce-Zr-B-V	167	-	-	-	4,0	-	-
19	Mn-Si-Ce-Al-Zr-B-Cr	177	-	-	-	4,0	-	-
20	Mn-Si-Ce-Al-Zr-V-P-Cr	203	-	49,5	-	17,0	-	6,0
21	Mn-Si-Ce-Al-Cr	205	-	9,5	-	7,0	-	6,0
22	Mn-Si-Ai-Ce-B	206	-	-	-	104,5	7,5	7,0
23	Mn-Si-Al-Ce-B-V	207	-	-	-	7,5	-	4,0
24	Mn-Si	410	266,0	237,5	133,0	103,0	12,5	-
25	Mn-Si	411	172,5	100,5	72,5	-	-	-
26	Mn-Si	412	308,0	232,0	-	185,0	10,5	-
27	Mn-Si	413	152,0	66,5	56,0	35,0	-	-
28	Mn-Si-Al-Ce-V	432	18,5	3,5	-	4,5	-	-
29	Mn-Si-Ce-Al-Zr-Cr	433	82,0	4,5	-	4,5	-	-
30	Mn-Si-Ce-Al-V-Cr	434	28,5	6,0	-	5,0	-	-
31	Mn-Si-Ce-Al-Zr-B-Cr	435	36,0	5,5	-	3,5	-	-
32	Mn-Si-Ce-Al-Zr-V-P-Cr	436	53,5	13,0	-	15,0	-	-
33	Mn-Si-Ce-Al-Zr-V-B-Cr	437	28,0	5,0	-	5,0	-	-
34	Mn-Si-Ce-Al-Zr-V-Cr	438	2,0	3,5	-	3,0	-	-
35	Mn-Si-Al-Ce-V	458	5,0	5,0	-	3,0	-	-
36	Mn-Si-Al-Ce-Zr-V	459	26,5	4,5	-	7,0	-	-
37	Mn-Si-Ce-Al-Zr-V-Cr	460	11,0	3,0	-	4,0	-	-
38	Mn-Si-Ce-Al-Zr-Cr	505	3,0	3,0	-	3,5	-	-
39	Mn-Si-Ce-Al-Zr-V-Cr	506	13,0	4,5	-	9,5	-	-
40	Mn-Si-Ce-Al-Zr-V-B-Cr	507	-	46,0	-	20,5	-	-
41	Mn-Si-Ce-Al-Mo	530	-	-	-	216,5	171,0	103,5
42	Mn-Si-Ce-Al	531	-	-	149,0	170,0	46,0	9,5
43	Mn-Si	597	150,5	106,5	59,5	17,5	-	-
44	Mn-Si	598	157,5	72,5	67,0	25,0	-	-
45	Mn-Si-Ce-Al-Cr	718	-	-	-	108,5	73,5	60,0
46	Mn-Si-Ce-Al-Cr	727	-	-	-	-	11,5	16,5
47	Mn-Si-Ce-B	728	-	203,5	194,0	-	-	187,0
48	Mn-Si-Ce-Al-Cr	881	-	-	-	95,0	207,5	9,5
49	Mn-Si-Ce-B	882	-	-	-	156,0	-	143,5
50	Mn-Si-Ce-Al	883	-	-	201,5	105,0	6,0	-
51	Mn-Si-Ce-B	894	-	-	-	208,0	22,0	8,5
52	Mn-Si-Ce-Al	895	-	-	-	108,5	-	165,5
53	Mn-Si-Ce-B	896	-	-	-	103,5	52,0	76,5
54	Mn-Si-Ce	127-2	-	103,5	-	96,5	74,5	75,0

$$Y = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \dots \\ y_n \end{pmatrix}, X = \begin{pmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & x_{1m} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & x_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & x_{nm} \end{pmatrix},$$

$$b = \begin{pmatrix} b_0 \\ b_1 \\ \dots \\ b_m \end{pmatrix}, e = \begin{pmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \dots \\ e_n \end{pmatrix}.$$

Формула коефіцієнтів множинної лінійної регресії у матричному вигляді має наступний вигляд:

$$b = (X^T X)^{-1} X^T Y,$$

де X^T – матриця, що транспонується до матриці X ; $(X^T X)^{-1}$ – матриця, обернена до матриці $X^T X$.

Розв’язуючи це рівняння, отримаємо матрицю-стовпчик b , елементи котрої i є коефіцієнтами рівняння множинної лінійної регресії.

Важливим показником якості побудованої моделі є коефіцієнт детермінації або величина достовірності апроксимації, яка визначає рівень точності прогнозу. Цей показник є статистичною мірою узгодженості, за допомогою якої можна визначити, наскільки рівняння регресії відповідає реальним даним.

Коефіцієнт детермінації R^2 – це квадрат коефіцієнта кореляції (коефіцієнта Пірсона) [5, 6]:

$$R = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 \sum (y_i - \bar{y})^2}},$$

де x_i – значення змінної X ; y_i – значення змінної Y ; \bar{x} – середнє арифметичне для змінної X ; \bar{y} – середнє арифметичне для змінної Y .

Коефіцієнт детермінації змінюється у діапазоні від 0 до 1. Якщо він дорівнює 0, це значить, що зв'язок між змінними регресійної моделі відсутній, та замість неї для оцінки значення вихідної змінної можна з таким самим успіхом використовувати просте середнє значення. Навпаки, якщо коефіцієнт детермінації дорівнює 1, це відповідає ідеальній моделі, коли всі точки спостережень знаходяться точно на лінії регресії, тобто сума квадратів їх відхилень дорівнює 0.

На практиці, якщо коефіцієнт детермінації наближається до одиниці, це вказує на те, що модель працює добре (має високу значимість), а якщо до нуля, то це означає, що вхідна змінна погано визначає поведінку вихідної, тобто лінійна залежність між ними відсутня. Вочевидь, що така модель буде мати низьку ефективність.

У залежності від рівня коефіцієнту детермінації, прийнято розділяти моделі на три групи:

при $0,8 < R^2 < 1$ – отримуємо модель хорошої якості;

при $0,5 < R^2 < 0,8$ – модель прийнятної якості;

при $0 < R^2 < 0,5$ – поганої якості.

Також при побудованні регресійної моделі можливо оцінити вплив (внесок) кожної предикторної змінної на значення залежної змінної, і в окремих випадках суттєво скоротити кількість незалежних змінних.

Важливим параметром при тестуванні статистичних гіпотез є величина *p-value* (або *p-значення*) [7–9]. Звичайно *p-value* дорівнює імовірності того, що випадкова величина з даним розподілом прийме значення, не менше, ніж фактичне значення тестової статистики та виражається числом від 0 до 1. Слугує для визначення, чи є отриманий результат експерименту випадковим. Статистично значущим вважається результат, *p-value* якого дорівнює рівню значимості або менше його. Це, як правило, позначається наступним чином: $p \leq 0,05$.

У випадку регресійної моделі достатньо добре себе зарекомендував такий метод, як покорова регресія. Покорова регресія – це спосіб побудо-

ви моделі шляхом додавання або видалення предикторних змінних. Існує декілька підходів до виконання покорової регресії, пряма покорова регресія та обернена покорова регресія. В прямій покоровій регресії рівняння спочатку не містить предикторів, вони вводяться по одному. В зворотній покоровій регресії – спочатку всі предиктори входять в рівняння регресії, потім по черзі виводяться з рівняння.

Побудова математичних моделей «склад-властивості» для дослідних зразків основного матеріалу сталей та ділянки перегріву при ЕШЗ. Побудову математичних моделей залежності механічних властивостей від хімічного складу основного матеріалу дослідних сталей, а також для ділянки перегріву при ЕШЗ дослідних сталей після високого відпуску покажемо на прикладі моделі ударної в'язкості *KCU* при температурі -40 °С.

Виконуємо наступні дії: По-перше, вилучаємо із експериментальних даних для 55 дослідних плавок ті плавки, для яких відсутні значення *KCU*₋₄₀: 598, 153, 597, 412, 413.

При використанні матриці для 49 дослідних сталей (табл. 4) отримана регресійна модель поганої якості, оскільки значення коефіцієнту детермінації нижче 0,5, а саме $R^2 = 0,44$.

Проаналізувавши діаграму зіставлення експериментальних і прогнозованих даних, виключаємо ще 12 плавок (№№ 458, 438, 165, 411, 37, 206, 33, 156, 410, 432, 881, 25), оскільки прогнозовані (розрахункові) значення *KCU*₋₄₀ для цих дослідних плавок різко відрізняються від загального тренду. Отримуємо матрицю з 37 варіантів сталей (табл. 5, рис. 1). І вже на цій матриці побудована регресійна модель хорошої якості ($R^2 = 0,84$):

$$KCU_{-40} = 556,89 - 2726,72 C + 2788,66 B - 375,29 Al + 134,424 Ce - 45,61 Cr - 28,27 Mn - 219,65 Ni + 45,25 P - 1790,66 S - 97,17 Si - 616,70 V - 345,55 Zr.$$

Для скороченої моделі з меншою кількістю незалежних змінних (хімічних елементів) виключаємо ті елементи, які значно не впливають на ве-

Таблиця 4. Відповідність номера експериментальної плавки номеру плавки в матриці

Номер плавки	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Номер експериментальної плавки	458	437	438	177	436	506	163	164	165	411	460	167	434	205	505
Номер плавки	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Номер експериментальної плавки	459	37	26	507	433	156	20	206	727	207	100	435	33	127-2	82
Номер плавки	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45
Номер експериментальної плавки	718	38	99	133	728	203	152	882	157	410	895	531	432	896	883
Номер плавки	46	47	48	49											
Номер експериментальної плавки	881	894	530	25											

Таблиця 5. Відповідність номера експериментальної плавки номеру плавки

Номер плавки	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Номер експериментальної плавки	437	177	436	506	163	164	460	167	434	205	505	459	26	507	433
Номер плавки	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	25	27	28	29	30
Номер експериментальної плавки	156	20	727	207	100	435	127-2	82	718	38	99	133	728	203	882
Номер плавки	31	32	33	34	35	36	37								
Номер експериментальної плавки	157	895	531	896	883	894	530								

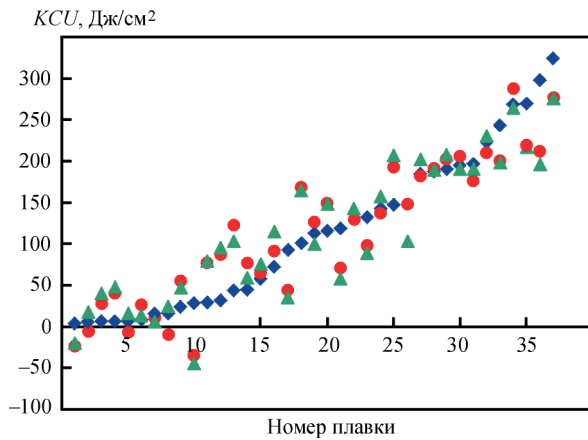


Рис. 1. Співставлення експериментальних (♦) та розрахункових значень KCU_{-40} для 37 дослідних плавок ($R^2 = 0,84$) з урахуванням всіх незалежних параметрів (●) і для скороченої кількості параметрів (▲) ($R^2 = 0,81$)

личину ударної в'язкості при температурі $-40\text{ }^\circ\text{C}$. При прямому порядку покрової регресії отримано хорошу модель ($R^2 = 0,81$):

$$KCU_{-40} = 549,75 - 302,65 Al - 3101,87 C - 44,03 Cr - 193,84 Ni - 2639,73 S - 117,84 Si - 569,92 V.$$

В цій моделі виключені такі незалежні змінні: Mn, P, Se, B, Zr. Результати показано на рис. 1.

На рис. 1 видно, що деякі розрахункові значення KCU_{-40} сталей № 437, 163, 167, 205, 26, 727, 435, 883, 894 за побудованою моделлю суттєво відрізняються від заданої лінії, тому виключаємо їх з матриці експериментальних значень (відповідність експериментальних плавок та номера плавки рис. 1 показано в табл. 6).

Отримуємо матрицю з 28 спостережень (дослідних сталей), будуємо регресійну модель, коефіцієнт детермінації $R^2 = 0,91$:

$$KCU_{-40} = 568,53 - 2732,83 C - 28,39 Mn - 119,04 Si - 1638,39 S + 38,66 P - 47,68 Cr - 205,94 Ni - 619,31 V - 382,65 Al + 75,81 Se + 2442,99 B - 439,62 Zr.$$

Таблиця 6. Відповідність експериментальних плавок номеру плавки

Номер плавки	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Номер експериментальної плавки	177	436	506	164	460	434	505	459	507	433	156	20	207	100	127
Номер плавки	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	25	27	28		
Номер експериментальної плавки	82	718	38	99	133	728	203	882	157	895	531	896	530		

Також можемо скоротити кількість хімічних елементів (виключаємо – P, Se, B, Zr), що використовуються в моделі, враховуючи, що значення $p\text{-value} \leq 0,05$ для цих елементів. В результаті отримуємо регресійну модель:

$$KCU_{-40} = 584,09 - 326,71 Al - 2647,62 C - 53,90 Cr - 32,83 Mn - 192,39 Ni - 2099,09 S - 132,66 Si - 542,62 V \text{ і коефіцієнт детермінації } R^2 = 0,91.$$

Розрахунок показує, що в цьому випадку є декілька значень KCU_{-40} , які значно відрізняються від загальної лінії. Виключаємо їх: плавки № 177, 506, 436, 164, 460.

Отримуємо модель:

$$KCU_{-40} = 573,52 - 362,89 Al - 2020,46 C - 64,01 Cr - 56,39 Mn - 276,03 Ni - 117,59 S - 108,44 Si - 662,79 V.$$

Коефіцієнт детермінації: $R^2 = 0,90$, що каже про хорошу якість моделі.

Співставлення експериментальних та розрахункових значень KCU_{-40} показана на рис. 2.

Таким чином, в результаті обробки всього об'єму експериментальної інформації для 55 дослідних плавок сталей, призначених для ЕШЗ (табл. 1), було побудовано математичні моделі «Хімічний склад – Механічні властивості» (ударна в'язкість, межа плинності, межа міцності, відносне подовження та відносне звуження) на основі застосування методу множинної (багатофакторної) лінійної регресії.

Всі побудовані моделі характеризуються високим значенням коефіцієнта детермінації ($R^2 > 0,8$), що визначає достатній рівень точності прогнозу.

Для створення скороченої математичної моделі застосовується метод покрової регресії, а для скорочення кількості незалежних змінних використовувався параметр $p\text{-value}$.

У побудованих регресійних моделях найбільше на механічні властивості основного матеріалу (сталі), призначених для ЕШЗ, впливають такі легуючі елементи як Mn, Cr, Zr. Менше впливають

Таблиця 7. Хімічний склад сталей для тестування

Сталь	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	V	Al	Ce	B	Zr	Mo	Cu
09ХГ2СЮЧ	0,09	2,00	0,45	0,01	0,015	1	0	0	0,05	0,004	0	0		
10Х2ГНМ	0,10	1,10	0,33	0,022	0,023	2,15	0,52	0	0,052	0	0	0		
10Х2ГНМА-А	0,10	0,96	0,27	0,007	0,006	2,09	0,2	0	0,005	0	0	0		
12ХМ	0,12	0,55	0,30	0,018	0,016	0,5	0,25	0	0,055	0	0	0	0,5	0,2
10ХГ2МЧ	0,10	2,10	0,30	0,018	0,016	1,2	0,15	0	0,055	0,018	0	0		
10Х2ГМ	0,10	0,93	0,30	0,018	0,016	2,3	0,66	0	0,055	0	0	0		

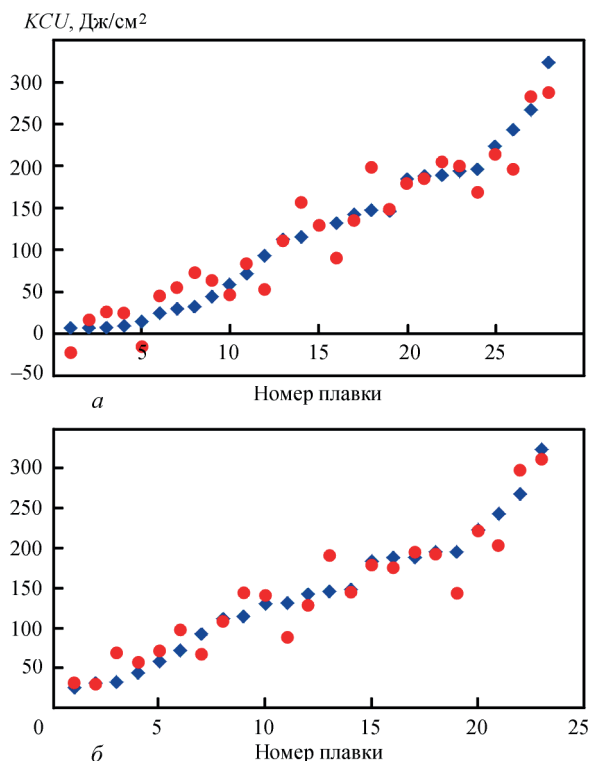


Рис. 2. Співставлення експериментальних (♦) та розрахованих (●) значень KCV_{-40} : а – для 28 дослідних сталей та повної кількості незалежних параметрів ($R^2 = 0,91$); б – для 23 дослідних сталей та скороченої кількості незалежних параметрів ($R^2 = 0,90$)

на механічні властивості Si, P, Al, V, Ce. Вплив Ni, S і В у побудованих моделях практично відсутній.

Для ділянки перегріву при ЕШЗ, судячи з регресійних моделей, найбільше впливають на механічні властивості металу такі хімічні елементи (за зростанням ступеню впливу): P, C, Mn, S, Cr, Ni, V, B, а вплив елементів Si, Ce, Zr малий.

Тестування побудованих математичних моделей. Розроблені моделі (регресійні рівняння) визначення механічних властивостей сталей, призначених для ЕШЗ, були протестовані на 6 марках сталей (табл. 7), для яких є відповідні експериментальні дані [7–9].

Для ділянки перегріву (ЗТВ, після відпуску, без нормалізації) було проведено порівняння з експериментальними даними результатів розрахунку за повними та скороченими моделями для KCV_{+20} , KCV_{-60} , KCU_{-60} , KCU_{-70} .

Побудовані моделі для прогнозування KCV_{-60} , KCU_{-60} та KCU_{-70} дають цілком адекватні значення у порівнянні з експериментальними даними. Мо-

делі для KCV_{+20} дають суттєво занижені значення (табл. 8).

Для основного металу (після нормалізації або закалювання та відпуску) було проведено порівняння з експериментальними даними результатів розрахунку за повними та скороченими моделями для KCV_{-40} , KCV_{-60} , межі плинності σ_r , межі міцності σ_b , відносного подовження δ , відносного звуження ψ .

Моделі для прогнозування KCV_{-40} дають адекватні значення, моделі для KCV_{-60} дають у деяких варіантах занижені, але досить близькі значення у порівнянні з експериментальними даними (табл. 9). Моделі для межі плинності σ_r , межі міцності σ_b , відносного звуження ψ дають адекватні значення, моделі для відносного подовження δ дають трохи завищені значення.

З метою вдосконалення (підвищення точності) моделей була проведена повторна процедура побудови регресійних моделей на основі розширеного об'єму експериментальної інформації з 55 дослідних плавок низьколегованих сталей до 61 сталі за рахунок доповнення експериментальних даних [7–9]. Це дозволило помітно покращити погодження розрахованих та експериментальних даних (табл. 10–12), для ударної в'язкості KCV (при -70 °С) на ділянці перегріву, для ударної в'язкості KCV (при -40 °С) на основному металі і для відносного подовження δ (основний метал).

Таким чином, найбільш доцільний шлях вдосконалення побудованих моделей полягає в розширенні бази експериментальних даних.

Таблиця 8. Ділянка перегріву (ЗТВ, після відпуску, без нормалізації)

Сталь	KCV_{+20}^1 , Дж/см ²		KCV_{-60}^2 , Дж/см ²	
	Модель	Експер.	Модель	Експер.
09ХГ2СЮЧ	111	–	79	–
10Х2ГНМ	61	142...161	36	12...21
10Х2ГНМА-А	79	181...209	82	16...102
12ХМ	197	–	1	–
10ХГ2МЧ	73	–	87	102...137
10Х2ГМ	54	–	10	44...60
09ХГ2СЮЧ	95	87...163	20	13...25
10Х2ГНМ	141	100...120	106	–
10Х2ГНМА-А	94	86...90	27	–
12ХМ	111	–	171	–
10ХГ2МЧ	118	–	-53	–
10Х2ГМ	137	–	109	–

Примітки. ¹Моделі дають занижені значення та потребують доопрацювання. ²Моделі дають адекватні значення.

Таблиця 9. Основний метал (після нормалізації або закалювання та відпуску)

Сталь	KCU ₋₄₀ ¹ , Дж/см ²			KCU ₋₆₀ ² , Дж/см ²		
	Модель	Скор. модель	Експер.	Модель	Скор. модель	Експер.
09ХГ2СЮЧ	120,31	133,71	-	117,05	115,88	84...188
10Х2ГНМ	139,17	124,78	94...192	131,98	87,64	100...107
10Х2ГНМА-А	97,30	155,57	155...163	94,73	89,11	117...142
12ХМ	341,69	356,50	-	93,09	128,16	-
10ХГ2МЧ	104,88	113,12	-	120,27	110,97	-
10Х2ГМ	155,01	130,20	-	144,46	83,95	-
σ _t ² , МПа			σ _h ³ , МПа			
Сталь	Модель	Скор. модель	Експер.	Модель	Скор. модель	Експер.
09ХГ2СЮЧ	341,01	347,55	360...395	490,04	492,99	560...600
10Х2ГНМ	469,92	458,26	460...503	585,36	570,97	565...610
10Х2ГНМА-А	433,56	433,90	460...503	576,89	581,01	565...610
12ХМ	318,00	323,13	318	491,00	491,00	491
10ХГ2МЧ	459,32	455,76	467...550	591,47	588,24	662...689
10Х2ГМ	470,30	448,05	437...487	588,90	569,29	578...604
δ ⁴ , %			ψ ³ , %			
Сталь	Модель	Скор. модель	Експер.	Модель	Скор. модель	Експер.
09ХГ2СЮЧ	30,13	30,79	22...28	71,255	70,64	49...80
10Х2ГНМ	24,46	23,68	15...20	64,080	66,62	55...67
10Х2ГНМА-А	23,60	23,85	15...20	64,494	65,57	55...67
12ХМ	23,00	26,73	23	67,599	69,82	
10ХГ2МЧ	25,04	26,44	20...26	68,368	68,49	
10Х2ГМ	25,38	23,24	21...26,6	64,067	66,41	

Примітки. ¹Моделі дають окремі занижені значення та потребують доопрацювання. ²Моделі дають близькі значення. ³Моделі дають адекватні значення. ⁴Моделі дають близькі, але декілька завищені значення та потребують доопрацювання.

Наведемо остаточний вид математичних моделей з урахуванням доопрацювання:

Ударна в'язкість (KCV та KCU) для ділянки перегріву (ЗТВ після відпуску, без нормалізації):

$$KCV_{+20} = 181,00 - 819,95 C + 4,88 Mn + 83,96 Si + 173,93 P - 605,91 S - 20,15 Cr - 199,17 V - 364,01 Al - 520,19 Ce + 3931,41 B - 430,55 Zr + 248,89 Mo;$$

Таблиця 10. Порівняння результатів моделей для KCV₋₇₀ для ділянки перегріву (ЗТВ, після відпуску, без нормалізації)

Сталь	Перший варіант ¹		Вдосконалений варіант ²	
	Модель	Експерим.	Модель	Експер.
09ХГ2СЮЧ	520	13...25	20	13...25
10Х2ГНМ	829	-	106	-
10Х2ГНМА-А	1167	-	27	-
12ХМ	350	-	171	-
10ХГ2МЧ	521	-	-53	-
10Х2ГМ	802	-	109	-

Примітки. ¹Моделі дають завищені значення і потребують доопрацювання. ²Моделі дають адекватні значення.

Таблиця 11. Порівняння результатів моделей для KCU_{-40°C} для основного металу (після нормалізації або закалювання і відпуску)

Сталь	Перший варіант ¹			Вдосконалений варіант ²		
	Модель	Скор. мод.	Експер.	Модель	Скор. модель	Експер.
09ХГ2СЮЧ	130	147	-	120,31	133,71	-
10Х2ГНМ	0	-29	94...192	139,17	124,78	94...192
10Х2ГНМА-А	82	96	155...163	97,30	155,57	155...163
12ХМ	64	144	-	341,69	356,50	-
10ХГ2МЧ	63	80	-	104,88	113,12	-
10Х2ГМ	0	-65	-	155,01	130,20	-

Примітки. ¹Моделі дають занижені значення та потребують доопрацювання. ²Моделі дають адекватні значення, та в деяких випадках потребують вдосконалення.

Таблиця 12. Порівняння результатів моделей для відносного подовження δ для основного металу (після нормалізації або закалювання і відпуску)

Сталь	Перший варіант ¹			Вдосконалений варіант ²		
	Модель	Скор. мод.	Експер.	Модель	Скор. модель	Експер.
09ХГ2СЮЧ	28	33	22...28	30,13	30,79	22...28
10Х2ГНМ	28	31	15...20	24,46	23,68	15...20
10Х2ГНМА-А	29	31	15...20	23,60	23,85	15...20
12ХМ	34	34	23	23,00	26,73	23
10ХГ2МЧ	26	33	20...26	25,04	26,44	20...26
10Х2ГМ	29	30	21...26,6	25,38	23,24	21...26,6

Примітки. ¹Моделі дають близькі, але декілька завищені значення та потребують доопрацювання. ²Моделі дають адекватні значення.

+ 28,1904 V – 304,692 Al ++ 147,574 Ce + 8400,33 B +
+ 933,64 Zr – 76,7431 Mo + + 161,927 Cu

2. Межа міцності:

$$\sigma_b = 376,487 + 197,733 B_{36} + 74,597 C_{36} - 80,1669 Si - 51,6227 S + 170,066 P + 58,1997 Cr + 52,2038 Ni - 62,8523 V - 414,44 Al + 330,174 Ce + 5461,85 B + 991,499 Zr - 130,434 Mo + 589,374 Cu$$

3. Відносне подовження:

$$\delta = 38,5232 - 46,8034 B_{36} - 2,12612 C_{36} - 0,0489085 Si - 75,0961 S - 4,93551 P - 4,2477 Cr + 5,78539 Ni + 7,0119 V + 16,5739 Al + 23,3941 Ce - 278,698 B - 64,3938 Zr - 26,2339 Mo + 27,954 Cu$$

4. Відносне звуження:

$$\psi = 77,5019 - 87,8572 B_{36} + 2,24134 C_{36} - 7,31298 Si - 86,2487 S - 11,5188 P - 1,78764 Cr - 0,778479 Ni + 39,5843 V + 33,1262 Al - 38,0401 Ce + 110,365 B - 129,132 Zr + 5,208 Mo.$$

Висновки

1. На основі раніш отриманих результатів експериментальних досліджень були побудовані математичні моделі залежності механічних властивостей кремній-марганцевих сталей, які призначені для електрошлакового зварювання і які характеризуються високою стійкістю до крихкого руйнування в зоні термічного впливу, а також ділянок перегріву, від хімічного складу цих сталей.

2. Для побудови математичних моделей був використаний метод множинної лінійної регресії. Побудовано математичні моделі для комплексу механічних властивостей основного металу: ударна в'язкість для температур (+20, –40, –60, –70 °C), межа плинності, межа міцності, відносне подовження та відносне звуження. Для ділянки перегріву при електрошлаковому зварюванні побудовані математичні моделі для ударної в'язкості (KCV та KCV) для температур: +20, –60, –70 °C.

3. Проведена первинна валідація побудованих моделей, результати якої показали, що побудовані моделі для ділянки перегріву (ЗТВ, після відпуску, без нормалізації) і для основного металу (після нормалізації або закалювання та відпуску), в основному, дають цілком адекватні значення у порівнянні з експериментальними даними, але, в окремих випадках, суттєво занижують або завищують значення механіч-

них властивостей. Показано, що найбільш доцільний шлях вдосконалення побудованих моделей полягає у розширенні бази експериментальних даних.

Список літератури

1. Egorova, S.V. (1988) *Alloying of Steel and its Weldability in Electroslag Welding without Subsequent Normalizing*. Киев, АН СССР. Национальный комитете по сварке.
2. Демиденко Е.З. (1981) *Линейная и нелинейная регрессия*. Москва, Финансы и статистика.
3. Себер Дж. (1980) *Линейный регрессионный анализ*. Москва, Мир.
4. Линник Ю.В. (1962) *Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений*. 2-е изд. Москва, Физматгиз.
5. Гмурман В.Е. (2004) *Теория вероятностей и математическая статистика: Уч. пособие для вузов*. 10-е изд. Москва, Высш. шк.
6. Елисеєва И.И., Юзбашев М.М. (2002) *Общая теория статистики. Уч. Елисеєва И.И. (ред.). 4-е изд., перераб. и доп.* Москва, Финансы и статистика.
7. Егорова С.В., Стеренбоген Ю.А., Юрчишин А.В. и др. (1980) Новые конструкционные стали, не требующие нормализации после электрошлаковой сварки. *Автоматическая сварка*, **11**, 44–46, 59.
8. Егорова С.В., Юрчишин А.В., Солина Е.Н. и др. (1991) Хладостойкая сталь повышенной прочности 09ХГ2СЮЧ для сварных сосудов высокого давления. *Там же*, **12**, 37–42.
9. Егорова С.В., Ляшук Ю.С., Кренделева А.И. и др. (1992) Исследование стойкости против отпускной хрупкости сварных соединений, полученных электрошлаковой сваркой без нормализации. *Там же*, **2**, 8–10.

References

1. Egorova, S.V. (1988) *Alloying of Steel and its weldability in electroslag welding without subsequent normalizing*. Kiev, AS USSR, National Welding Committee [in Russian].
2. Demidenko, E.Z. (1981) *Linear and nonlinear regression*. Moscow, Finansy i Statistika [in Russian].
3. Seber, G. (1980) *Linear regression analysis*. Moscow, Mir [in Russian].
4. Linnik, Yu.V. (1962) *Least squares method of and fundamentals of mathematical-statistical theory of processing observations*. 2nd Ed. Moscow, Fizmatgiz [in Russian].
5. Gmurman, V.E. (2004) *Probability theory and mathematical statistics*. In: Manual for higher education inst. 10th Ed. Moscow, Vysshaya Shkola [in Russian].
6. Eliseeva, I.I., Yuzbashev, M.M. (2002) *General theory of statistics: Manual*. 4th Ed. Ed. by I.I. Eliseeva, Moscow, Finansy i Statistika [in Russian].
7. Egorova, S.V., Sterenbogen, Yu.A., Yurchishin, A.V. et al. (1980) New structural steels not requiring normalizing after electroslag welding. *Avtomatich. Svarka*, **11**(332), 44–46, 59 [in Russian].
8. Egorova, S.V., Yurchishin, A.V., Solina, E.N. et al. (1991) Cold-resistant steel 09KhG2SYuCh of higher strength for pressure vessels. *Ibid.*, **12**(465), 37–42 [in Russian].
9. Egorova, S.V., Lyashchuk, Yu.S., Krendelyova, A.I. et al. (1992) Investigation of resistance to temper brittleness of welded joints produced by electroslag welding without normalizing. *Ibid.*, **2**(467), 8–10 [in Russian].

MATHEMATICAL MODELS OF THE DEPENDENCE OF MECHANICAL PROPERTIES ON CHEMICAL COMPOSITION OF STEELS FOR ESW

S.V. Egorova, O.V. Makhnenko, G.Yu. Saprykina, D.P. Sineok

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, 11 Kazymyr Malevych Str, 03150, Kyiv, Ukraine,
E-mail: office@paton.kiev.ua

The paper deals with the possibility of constructing mathematical models of the dependence of mechanical properties of silicon-manganese steels designed for ESW, which have high brittle fracture resistance in the HAZ, as well as of the overheated zone, on chemical composition. Data on mechanical properties of these steels were obtained as a result of studying the influence of additional alloying (microalloying) of silicon-manganese steel by manganese, chromium, vanadium, boron, cerium and zirconium on overheating resistance at electroslag welding. The method of multiple linear regression was used for construction of mathematical models. Mathematical models were constructed for the following set of base metal mechanical properties: impact toughness for temperatures of (+20, -40, -60, -70 °C), yield limit, ultimate strength, relative elongation and reduction in area. For overheated zone at electroslag welding mathematical models were constructed for impact toughness (*KCU* and *KCV*) for temperatures of +20, -60, -70 °C. Initial validation of the constructed models was performed. 9 Ref., 12 Tabl., 2 Fig.

Keywords: silicon-manganese steels, chemical composition, microalloying, mechanical properties, mathematical models, electroslag welding

Надійшла до редакції 10.12.2020

РОЗРОБЛЕНО в ІЕЗ ім. Є.О. Патона

Електрошлакові технології виготовлення та ремонту деталей і переплаву відходів у струмопідвідному кристалізаторі

Прокатні валки. Вісі. Вали. Бронеплити.
Піки гідромолотів.

Діаметр деталей 40...1000 мм
Товщина шару, що наплавляється 10...100 мм
Продуктивність наплавлення до 600...700 кг/год
Витрати електроенергії до 1500 кВт-год/т

Шлам. Стружка.
Відходи кабельного та шарикопідшип-
никового виробництва.

Діаметр зливків до 300 мм
Продуктивність переплаву до 100 кг/год

