

А.С.Козачек, Э.В.Приходько

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ СОЧЕТАНИЙ
КОНЦЕНТРАЦИЙ КРЕМНИЯ, МАРГАНЦА, НИКЕЛЯ, ХРОМА,
МОЛИБДЕНА, ВАНАДИЯ И КОБАЛЬТА НА МЕХАНИЧЕСКИЕ
ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЫСОКОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ.**

Приводятся результаты обобщения исследований А.Прайста и М.Мейя о влиянии легирующих элементов, использующихся при производстве высокопрочных сталей методом вычислительного эксперимента.

Введение. Усовершенствование известных и разработка новых моделей твердых и жидких растворов, параметры которых могут быть найдены на основе анализа электронного строения компонентов и результатов их взаимодействия, имеет определяющее значение для развития общей теории легирования. Поскольку, известные к настоящему времени методики расчетов подобных параметров, имеющих квантово – механическое обоснование, мало пригодны для численных расчетов реальных сплавов из – за низкой точности, существует необходимость в разработке других прикладных методик, базирующихся на полуэмпирическом обобщении опытных данных. В этих условиях на развитие современных представлений о механизме и результатах раздельного и комплексного легирования стали основными легирующими элементами существенное влияние оказали результаты работы [Вязкость и разрушение высокопрочных материалов. Под ред. Л.М.Гордон. – М.: Металлургия, 1972г. – 298с.].

Метод исследования.

В этой работе методом вычислительного эксперимента на основе факторного анализа было исследовано влияние различных сочетаний концентраций кремния, марганца, никеля, хрома, молибдена, ванадия и кобальта на прочностные и пластические свойства сталей после различных режимов термообработки (отпуск от 200 до 500⁰С). Был проведен анализ данных, рассчитаны модельные параметры по экспериментальным данным и получены регрессионные уравнения, описывающие механические свойства:

$$\sigma_m = 1043 - 0,09 * T_{отп} - 193 * d - 4048 * \text{tg}\alpha + 20 * Z^Y \quad r = 0,83 \quad (1)$$

$$\sigma_\epsilon = 1249 - 0,177 * T_{отп} - 178 * d - 8154 * \text{tg}\alpha + 155 * Z^Y \quad r = 0,93 \quad (2)$$

$$G_{Ic} = 51 + 0,009 * T_{отп} + 13,4 * d - 824 * \text{tg}\alpha - 11 * Z^Y \quad r = 0,76 \quad (3)$$

$$W/A_{(c,н)} = -3,24 + 0,0048 * T_{отп} + 1,25 * d + 73,5 * \text{tg}\alpha - 5,21 * Z^Y \quad r = 0,67 \quad (4)$$

где σ_m – предел текучести, σ_ϵ – предел прочности, G_{Ic} – вязкость разрушения при статическом изгибе, $W/A_{(c,н)}$ – работа разрушения при статическом изгибе, d , $\text{tg}\alpha$, Z^Y – параметры межатомного взаимодействия в расплаве.

Суть дальнейшего эксперимента заключалась в том, что к исходному химическому составу (табл.1) в одном случае прибавлялось по 0,5% Si, во

втором – 1,5% Ni, а в третьем – 0,5% Mo. По этим данным были рассчитаны новые модельные параметры и по уравнениям (1–4) свойства. Результаты расчета приведены в табл. 2 и 3.

Результаты эксперимента.

Из табл.3 следует, что в ряде случаев (для никеля № 6, 10, 14, 16) повышение концентрации легирующих элементов приводит к ухудшению прочностных свойств. Такой же эффект оказывает излишние добавки Si и Mo для сплавов №14 и №16.

Как следует из представленных на рис.1 и 2 данных, между прочностными свойствами и сочетанием модельных параметров, имеет место простая линейная зависимость. Для других же свойств такие зависимости носят нелинейный характер (рис.3 и 4), что усложняет их описание (уравнения 5 и 6):

$$G_{Ic} = 0,37x^2 - 1,41x + 3,49 \quad r^2 = 0,7 \quad (5)$$

$$W/A_{(c,и)} = 2,43x^2 - 2,15x + 0,85 \quad r^2 = 0,68 \quad (6)$$

Особенностью представленных результатов является учет технологических факторов (температура отпуска изменялась от 200 до 500⁰C). Когда одновременно изменяются и материаловедческие, и технологические факторы, т. е. моделируются условия получения данных (табл. 1).

Таблица 1. Состав исследованных в работе [1] высокопрочных сталей

№ п/п	Химический состав, вес%							
	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	V	Co
1	0,39	0,1	0,13	1,46	0,73	0,24	0,11	0
2	0,39	1,08	1,08	1,75	0,78	0,56	0,21	0
3	0,41	0,11	1,03	1,57	0,74	0,24	0,18	0,96
4	0,38	1,02	0,1	1,6	0,75	0,5	0,11	1,06
5	0,39	0,1	1,02	3,1	0,65	0,5	0,1	0
6	0,37	0,1	1,02	3,1	0,76	0,26	0,21	0
7	0,42	0,11	0,09	3,05	0,67	0,52	0,19	1,07
8	0,39	1,02	1,1	3,3	0,75	0,27	0,12	1,05
9	0,37	0,12	0,08	1,51	1,47	0,46	0,18	0
10	0,41	0,96	1,04	1,54	1,47	0,27	0,12	0
11	0,39	0,12	1,04	1,51	1,45	0,53	0,09	1
12	0,39	1,03	0,1	1,51	1,49	0,27	0,21	0,97
13	0,38	0,11	1,05	3,05	1,44	0,26	0,2	0
14	0,41	1,07	0,1	3,05	1,44	0,26	0,2	0
15	0,1	0,14	0,1	3	1,5	0,26	0,1	1,04
16	0,4	1,06	0,13	3,2	1,68	0,49	0,21	1,01

Таблица 2. Параметры межатомного взаимодействия, рассчитанные для опытных сталей

№ п/п	d	$\text{tg}\alpha$	Z^Y
1	2,7624	0,0886	1,2272
2	2,743	0,0885	1,3019
3	2,7639	0,0886	1,2709
4	2,7433	0,0887	1,2886
5	2,7672	0,0888	1,2763
6	2,7701	0,0888	1,2764
7	2,7617	0,089	1,2791
8	2,746	0,089	1,3324
9	2,767	0,0883	1,2553
10	2,7424	0,0884	1,3065
11	2,7681	0,0884	1,2948
12	2,7425	0,0885	1,3064
13	2,7692	0,0886	1,2973
14	2,7385	0,0888	1,3136
15	2,809	0,0884	1,276
16	2,7432	0,0888	1,3447

Таблица 3. Изменение предела прочности при заданных увеличениях концентраций Si, Ni и Mo

№ п/п	Прирост предела прочности, Н/мм ²		
	Si, +0,5%	Ni, +1,5%	Mo, +0,5%
1	116,1	73,6	84,0
2	224,2	192,5	205,0
3	91,9	58,4	69,6
4	49,1	9,1	21,1
5	100,9	58,8	70,6
6	3,1	-39,0	-27,4
7	64,3	30,2	34,2
8	168,7	128,6	142,4
9	38,6	4,7	15,4
10	15,0	-16,7	-4,4
11	61,0	19,8	31,2
12	73,3	33,6	46,1
13	77,9	44,1	56,3
14	-51,0	-90,8	-77,6
15	32,6	-10,3	0,5
16	-120,5	-152,1	-146,5



Рис. 1. Соотношение рассчитанных по уравнению (1) и экспериментальных значений предела текучести



Рис. 2. Соотношение рассчитанных по уравнению (2) и экспериментальных значений предела прочности

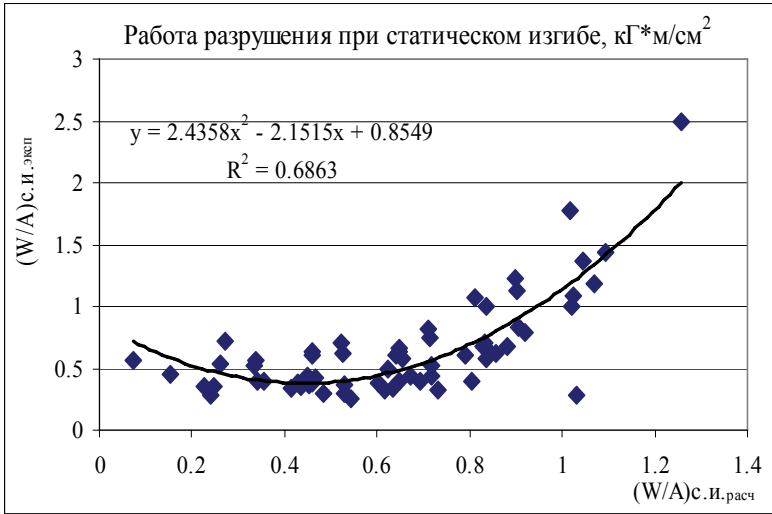


Рис. 3. Соотношение рассчитанных по уравнению (4) и экспериментальных значений работы разрушения



Рис. 4. Соотношение рассчитанных по уравнению (3) вязкости разрушения и ее экспериментальных значений

Выводы:

Оптимальный состав стали, с точки зрения сочетания высоких значений вязкости разрушения и прочности (предела текучести), оказывается разным для разных температур отпуска.

Показано (табл.3), что эффективность влияния любой добавки является переменной величиной, зависящей от состава базовой композиции. Например, для сплавов № 14 и 16 добавление к базовому составу по 0,5% Si – в первом случае, 1,5% Ni – во втором и 0,5% Mo – в третьем приводит к значительному ухудшению прочностных свойств.

*Статья рекомендована к печати
докт.техн.наук, проф. Д.Н.Тогобицкой*