

А.С.Козачёк, Э.В.Приходько

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ОСНОВНЫХ ЛЕГИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ НА СВОЙСТВА СРЕДНЕУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ

Предложен новый подход и методика оценки влияния конкретного легирующего элемента в комплексе с основным составом на механические свойства сталей. Получены уравнения, описывающие механические свойства среднеуглеродистых сталей с учетом температуры отпуска. Показано, что данная методика применима для учета влияния марганца, хрома, кремния и никеля в любом соотношении компонентов.

сталь, механические свойства, влияние легирующего элемента, соотношению компонентов, температура отпуска, уравнения

Состояние вопроса. Для ускорения научно–технического прогресса в металлургии необходимо все более глубокое изучение закономерностей формирования структуры и свойств многокомпонентных металлических расплавов. Поэтому для теории металлургических процессов весьма актуальна проблема привлечения достижений теории химической связи, физического материаловедения, современных математических методов для разработки новых теоретических и нестандартных эмпирических подходов, позволяющих решать новые классы прикладных и научных задач, в том числе прогнозировать свойства готового проката. Разработанные к настоящему времени подходы к прогнозированию влияния состава на свойства сплавов не обеспечивают достаточно адекватного отображения многообразия конкретных реальных механизмов формирования свойств сплавов в процессах их кристаллизации и последующей деформационно–термической обработки. В связи с этим разработка полуэмпирических описательных моделей сохраняет актуальность в прикладной теории легирования. Для создания упомянутых описательных моделей принципиальное значение имеет разработка физико–химических и термодинамических критериев, позволяющих обобщать информацию о составе многокомпонентных сплавов и снижать параметричность описательных моделей, повышая их точность.

Цель исследования. При анализе влияния состава сталей на их свойства большое значение имеет выявление роли основных легирующих элементов (Si, Mn, Cr, C, Ni и Mo) [1]. Для решения поставленной задачи были проанализированы литературные данные термоупрочненные легированные стали, общее число плавок составило 358 из основных источников [2–4] (табл.1).

Методика исследования. Использована разработанная в ИЧМ методика моделирования свойств металлургических расплавов через параметры их химического состава (d , tga , Z^Y) [5] и получены корреляционные

уравнения, описывающие свойства по основным модельным параметрам (табл.2).

Таблица 1. Колеблемость химических составов (min–max/ср.)

Элемент	[1]	[2]	[3]	Общий
C	<u>0,22–0,94</u> 0,377	<u>0,12–0,45</u> 0,293	<u>0,02–0,94</u> 0,414	<u>0,02–0,94</u> 0,391
Mn	<u>0,06–2,44</u> 1,213	<u>0,25–1,15</u> 0,593	<u>0,02–1,68</u> 0,703	<u>0,02–2,44</u> 0,899
Cr	<u>0,54–1,68</u> 1,265	<u>0,5–1,5</u> 1,056	<u>0,06–5,5</u> 3,339	<u>0,06–5,5</u> 2,357
Mo	<u>0,06–1,18</u> 0,258	<u>0,2–0,4</u> 0,288	<u>0,025–5,0</u> 1,475	<u>0,025–5,0</u> 1,009
W	<u>0,051–0,72</u> 0,494		<u>0,41–4,84</u> 1,713	<u>0,051–4,84</u> 0,900
Ti	<u>0,04–0,88</u> 0,278	<u>0,06–0,06</u> 0,06	<u>0,02–0,54</u> 0,316	<u>0,02–0,88</u> 0,266
V	<u>0,07–0,15</u> 0,101	<u>0,03–0,14</u> 0,115	<u>0,01–1,6</u> 0,544	<u>0,01–1,6</u> 0,355
Ni	<u>0,06–2,61</u> 1,273	<u>0,3–4,2</u> 1,479	<u>0,06–18,08</u> 1,652	<u>0,06–18,08</u> 1,463
Si	<u>0,17–1,3</u> 0,624	<u>0,27–1,4</u> 0,503	<u>0,11–2,44</u> 0,909	<u>0,11–2,44</u> 0,778
Nb	<u>0,07–0,1</u> 0,085		<u>0,007–0,28</u> 0,144	<u>0,007–0,28</u> 0,115
P	<u>0,017–0,027</u> 0,023	<u>0,025–0,035</u> 0,029	<u>0,007–0,018</u> 0,014	<u>0,007–0,035</u> 0,022
S	<u>0,014–0,030</u> 0,020	<u>0,025–0,035</u> 0,029	<u>0,005–0,101</u> 0,036	<u>0,005–0,101</u> 0,025
Cu	<u>0,76–0,76</u> 0,76	<u>0,025–0,30</u> 0,271	<u>1,75–1,75</u> 1,75	<u>0,025–1,75</u> 0,885

Таблица 2. Модельные уравнения для описания свойств сталей

Модель	Коэффициенты корреляции			
	[1]	[2]	[3]	Объед. масс.
$\sigma_m = f(t_{\text{отп}}, d, \text{tg}\alpha, Z^Y)$	$r=0,82$	$r=0,87$	$r=0,44$	$r=0,78$
$\sigma_\varepsilon = f(t_{\text{отп}}, d, \text{tg}\alpha, Z^Y)$	$r=0,85$	$r=0,90$	$r=0,43$	$r=0,83$
$\psi = f(t_{\text{отп}}, d, \text{tg}\alpha, Z^Y)$	$r=0,68$	$r=0,56$	$r=0,72$	$r=0,83$
$\delta = f(t_{\text{отп}}, d, \text{tg}\alpha, Z^Y)$	$r=0,62$	$r=0,81$	$B m r=0,20$	$r=0,41$

На данном этапе анализа четко прослеживается определяющая роль на механические свойства температуры отпуска. Если для объединенного массива уравнения типа $\sigma_m=f(d, \text{tg}\alpha, Z^Y)$ и $\sigma_\sigma=f(d, \text{tg}\alpha, Z^Y)$ характеризуются коэффициентами корреляции 0,54 и 0,68 соответственно, то введение $t_{\text{отп}}$, как независимого параметра, позволяет поднять точность описательных моделей $\sigma_m=f(t_{\text{отп}}, d, \text{tg}\alpha, Z^Y)$ $r=0,82$ и $\sigma_\sigma=f(t_{\text{отп}}, d, \text{tg}\alpha, Z^Y)$ $r=0,90$.

Сопоставительный анализ уравнений (1) и (2) показал несущественное влияние параметров d и $\text{tg}\alpha$ на точность прогнозирования прочностных свойств, а для относительного удлинения дополнительное введение параметров d и $\text{tg}\alpha$ не повлияло на точность прогнозной модели. На основании проведенного анализа было принято решение об использовании уравнений 1 и 4 в дальнейших исследованиях.

$$\sigma_{\text{в}} = -1809 - 2 t_{\text{отп}} + 3169 Z^Y \quad r=0,87 \quad (1)$$

$$\sigma_{\text{в}} = 8899 - 2 t_{\text{отп}} - 2851 d - 21042 \text{tg}\alpha + 2416 \quad r=0,90 \quad (2)$$

$$\delta = 11 + 0,035 t_{\text{отп}} - 9 d + 445 \text{tg}\alpha - 21,8489 Z^Y \quad r=0,81 \quad (3)$$

$$\delta = 19 + 0,035 t_{\text{отп}} - 18 Z^Y \quad r=0,81 \quad (4)$$

Значительный диапазон колеблемости свойств обуславливает использование для обработки исследуемого массива данных «метода картирования». Предлагаемая методика позволяет оценить роль легирующих элементов в формировании механических свойств сталей и выявлять наиболее значимые для исследуемой группы сталей.

Основной массив опытных данных разделяется на несколько составных частей, соответственно числу компонентов, влияние которых исследуется. Так, если анализируется роль кремния, то формируемый массив включает только стали с Si, а бескремнистые стали из этой выборки исключаются. Аналогичным образом в случае изучения роли хрома в выборку для анализа не включаются стали, которые не содержат Cr. При таком подходе в каждом конкретном случае анализируется соответствующая часть общей выборки данных. Для каждого варианта рассчитывается химический эквивалент (Z^Y) состава, который обозначается индексом того элемента, роль которого рассматривается. В первом случае это Z^Y_{Si} , а во втором – Z^Y_{Cr} . Информация о численных значениях Z^Y_{N} на картограммах для $\sigma_{\text{в}}$, σ_{T} , δ и ψ при различных конкретных температурах отпуска сопоставляются с соответствующими концентрациями изучаемого легирующего компонента. Картограммы на рисунках 1 и 2 дают возможность отдельно оценить степень влияния марганца и хрома на свойства сталей. Так на рис.1 и 2 видно, что на предел прочности в большей степени оказывают влияние Z^Y_{Mn} и Z^Y_{Cr} , однако пренебрегать влиянием марганца и хрома нельзя, снижение концентраций этих элементов приводит к снижению значений предела прочности.

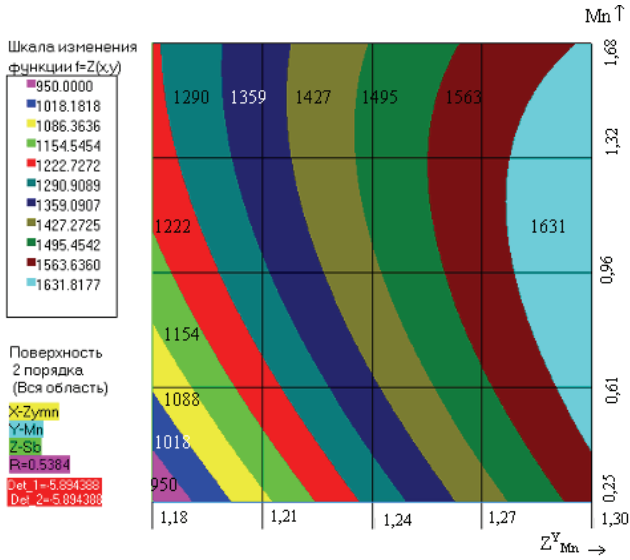


Рис.1. Зависимость значений σ_v при $t_{отп.}=400^0\text{C}$ от сочетания параметра Z^v_{Mn} и концентрации марганца.

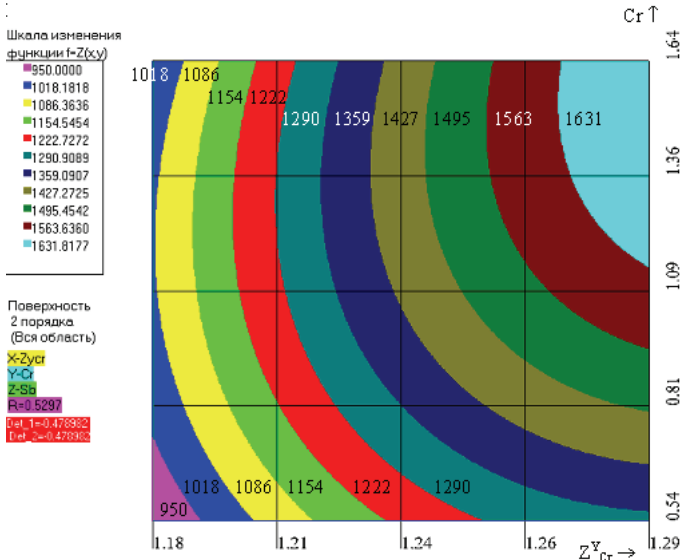


Рис.2. Зависимость значений σ_v при $t_{отп.}=400^0\text{C}$ от сочетания параметра Z^v_{Cr} и концентрации хрома.

Располагая обработанной в виде картограмм типа Свойство \rightarrow [Me] $\rightarrow Z^v_{Me}$ экспериментальной информацией, можно регулировать раз-

личные свойства одним из трех путей: варьируя [Me], регулируя базовый параметр Z'_i или комбинируя первый и второй вариант влияния на состав стали. В последнем случае предполагается, что выбирая значения того или иного [Me] и Z'_i следует учесть сопутствующий этим координатам уровень пластических свойств – δ и ψ .

В качестве примера в табл.3 приведены составы трех среднеуглеродистых конструкционных сталей, для которых реализована описанная выше процедура расчета. По данным расчетов Z' (Cr, Ni, Si), используя картограммы в координатах (Cr, Si, Ni) – σ_b , σ_T , ψ , δ – (Z'_{Cr} , Z'_{Si} , Z'_{Ni}), определяются значения механических и пластических свойств.

Таблица 3. Химический состав и Z' сталей.

№ п/п	Химсостав, % вес.						Z'
	C	Mn	Cr	Mo	Ni	Si	
1	0,36	1,28	1,07	0,26	2,29	0,29	$Z'_{Cr}=1,704$
2	0,36	1,28	1,27	–	2,51	0,30	$Z'_{Si}=1,880$
3	0,36	0,45	0,75	0,25	1,45	0,27	$Z'_{Ni}=1,946$

В табл.4 полученные результаты сопоставлены с экспериментальными данными для приведенных составов, что свидетельствует об удовлетворительной сходимости прогнозируемых и фактических значений свойств.

Помимо марганца и хрома, методика рассматривалась применительно к кремнию и никелю. Установлена ее применимость к любому соотношению компонентов, включая кремний и никель (см. табл.4).

Выводы:

Предлагаемая методика позволяет оценивать роль влияния конкретно легирующего элемента в комплексе с основным составом на механические свойства сталей.

Получены уравнения (1–4), описывающие механические свойства среднеуглеродистых сталей с учетом температуры отпуска.

Построения карт поверхностей осуществляется для конкретной постоянной базовой термической обработки.

Таблица 4. Экспериментальные и рассчитанные по картограммам значения свойств сталей из табл.7.

Вес.% Me	Z ^у _{расч.}	$\sigma_{\text{н}}$ 400 ⁰ C	$\sigma_{\text{г}}$ 400 ⁰ C	ψ 400 ⁰ C	δ 400 ⁰ C	$\sigma_{\text{н}}$ 500 ⁰ C	$\sigma_{\text{г}}$ 500 ⁰ C	ψ 500 ⁰ C	δ 500 ⁰ C	$\sigma_{\text{н}}$ 600 ⁰ C	$\sigma_{\text{г}}$ 600 ⁰ C	ψ 600 ⁰ C	δ 600 ⁰ C
[Cr]=1,07	1,704 (Cr)	1402 1504	1250 1284	40 45,4	6 10,33	1200 1221	1150 1102	50 45,86	8 11,89	1000 951	900 804	55 53,6	11 15,45
[Si]=0,3	1,880 (Si)	1500 1462	1400 1319	46 46,54	7 9,69	1200 1168	1000 1061	50 5,81	7 11,38	1000 1091	800 929	60 57,43	9 14,43
[Ni]=1,45	1,946 (Ni)	1400 1562	1300 1366	60 42,25	11 10,44	1200 1266	1100 1199	65 44,89	15 11,19	1000 1027	900 935	70 54,87	19 14,93

Числитель – экспериментальные значения; знаменатель – расчетные значения.

1. *Козачёк А.С. Приходько Э.В.* Исследование влияния различных сочетаний концентраций кремния, марганца, никеля, хрома, молибдена, ванадия и кобальта на механические характеристики высокопрочных сталей. // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. Сб. научн. Тр. ИЧМ. им. З. И. Некрасова НАНУ. –2008. – №18. – С.216–221.
2. *Браун М.П.* Комплексно–легированные конструкционные стали. К.: Наукова думка, 1965. – 291 с.
3. *Стали и сплавы*. Марочник: Справ. изд. / Сорокин В.Г. и др. –М.: «Интермет Инжиниринг». –2001. – 608 с.
4. *Высокопрочная сталь*. Пер. с англ. Фридман З.Г., Марьяновская Т.С. – М.: Металлургия, 1965. 255 с.
5. *Приходько Э.В.* Эффективность комплексного легирования сталей и сплавов. – К.: Наукова думка, 1995. –292 с.

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

О.С.Козачок, Е.В.Приходько

Оцінка впливу основних легуючих елементів на властивості середньуглицевих сталей

Запропоновано новий підхід і методика оцінки впливу конкретного легуючого елемента в комплексі з основним складом на механічні властивості сталей. Одержано рівняння, що описують механічні властивості середньуглицевих сталей з урахуванням температури відпуску. Показано, що дана методика може бути застосована для обліку впливу марганцю, хрому, кремнію і нікелю в будь-якому співвідношенні компонентів.