

УДК 621.771.2:54.06:669.02/09:620.18

Д.Н. Тогобицкая, В.П. Пиптюк, И.Н. Логозинский, Б.А. Левин,
А.С. Козачёк, О.В. Кукса, Ю.М. Лихачёв

**СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К ВЫБОРУ ОПТИМАЛЬНОГО
ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА СТАЛИ,
ОБЕСПЕЧИВАЮЩЕГО ТРЕБУЕМЫЙ УРОВЕНЬ
МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ**

Аннотация. На примере стали марки 14X17H2 показана методика определения оптимального элементного состава с использованием параметров межатомного взаимодействия. Получены закономерности, позволяющие выполнить оценку влияния примесно-микролегирующей подсистемы на механические свойства стали и внести соответствующие коррективы за счет элементов матричной подсистемы и изменения режима термообработки.

Ключевые слова: состав, свойства, параметры межатомного взаимодействия, прогнозирование.

Введение. В последнее время в литературе все больше обсуждаются возможности и целесообразность замены стали другими конструктивными материалами – алюминий, сплавы, керамика, пластмассы, различные композиты и др. Подводя итоги 2014 г., президент НАН Украины Б.Е. Патон, в числе важнейших фундаментальных исследований, имеющих мировой уровень в области материаловедения, отметил успехи в создании материалов принципиально нового класса – высокоэнтропийных сплавов, имеющих уникальную высокотемпературную прочность, недостижимую для обычных сталей и сплавов, что позволяет ожидать создание нового поколения жаропрочных и жаростойких материалов для турбинных лопаток, сварочных материалов и др.

В то же время авторы работы «Сталь и альтернативные материалы: анализ и прогноз» [1,2], рассматривая проблемы замены стали альтернативными материалами в обозримом периоде, приходят к вы-

© Тогобицкая Д.Н., Пиптюк В.П., Логозинский И.Н., Левин Б.А.,
Козачёк А.С., Кукса О.В., Лихачёв Ю.М., 2015

воду – экономически оправданной заменой обычной стали является только один материал – сталь более высокого качества.

Способы воздействия на процессы структурообразования стали и сплавов непрерывно совершенствуются, и их роль в комплексном подходе к решению проблемы только возрастает. Однако определение оптимального химического состава и запрограммированных в нем потенциальных возможностей сталей и сплавов, как конструкционных материалов, было и остается актуальной задачей.

Результаты исследований. В настоящей работе на примере стали 14X17H2 описан подход к комплексному решению задач оптимизации химического состава сталей, который базируется на накопленном в ИЧМ НАНУ опыте моделирования структуры и свойств металлических расплавов [3]. Реализация выполнена совместно со специалистами ПАО «Днепроспецсталь» (г. Запорожье) в реальных промышленных условиях в рамках стратегии развития информационно-математического обеспечения системы контроля и управления качеством продукции. Соблюдение четких правил паспортизации данных, включающей всю полноту информации без каких-либо предварительных обработок и «сглаживаний», а также наличие прикладного сервиса обработки данных (средства прикладной статистики, сервис разнопланового проецирования данных и поиск скрытых закономерностей) позволяют выполнить многоплановый поиск и анализ данных [4].

Систематизация полученной информации позволяет реализовать по принципу «матрешки» последовательный анализ технологии и производимого сортамента для каждого из цехов.

Механические свойства металлопродукции и химический состав стали обычно имеют широкую колеблемость, зашумленность и зачастую неполноту данных. В связи с этим принята концепция оценки достоверности данных путем поэтапного анализа исходной информации путем внутренней согласованности данных.

В соответствии с ГОСТом 5632-72 на сталь 14X17H2 регламентирован следующий химический состав С,% - 0,11-0,17; Si,% <0,8; Mn,% <0,8; Cr,% 16,0-18,0; Ni,% 1,5-2,5; S,% ≤0,025; P,% ≤0,03. Фактические значения механических характеристик от общего объема производимой продукции из этой стали за 2009-2014г.г. варьируются в пределах: $\sigma_{\text{в}}$ (кгс/мм²) - (111-125; 92 % значений), $\sigma_{\text{т}}$

(кгс/мм²) - (86-104; 95 %), δ (%) - (14 -24; 99 %), ψ (%) - (48-67; 95 %), КСУ (кгс м/см²) – (5-11; 80%).

В соответствии с разработанной Э.В. Приходько концепцией направленной химической связи [3] основными параметрами, характеризующими элементарные процессы формирования состава, структуры и свойств расплавов и продуктов кристаллизации являются: Z^Y (e) – параметр межатомного взаимодействия для данного химического состава, характеризующий зарядовое состояние системы: d (10⁻¹нм) – параметр структурного состояния, $tg\acute{\alpha}$ - параметр, который характеризует изменение электронной плотности атомов в зависимости от радиуса. Для расчета интегральных и парциальных параметров, характеризующих межатомное взаимодействие в расплаве как единой физико-химической системы, использован алгоритм и соответствующее программное обеспечение информационно-аналитической системы «Металл»[4].

Кодировка в модельных терминах информации о составе растворов и расплавов и сосуществующих в них фазах обеспечивает:

- а) комплексный учет характеристик межатомного взаимодействия между всеми реальными и гипотетическими парами атомов;
- б) свертку информации о составе многокомпонентных материалов, что позволяет понизить размерность и повысить точность описательных моделей, связывающих их состав и свойства (табл. 1, 2).

На примере круга диаметром заготовки 158 мм показано влияние зарядового Z^Y и структурных параметров d и $tg\acute{\alpha}$, характеризующих изменение электронной плотности атомов в зависимости от радиуса, на ударную вязкость и предел прочности соответственно (рис.1).

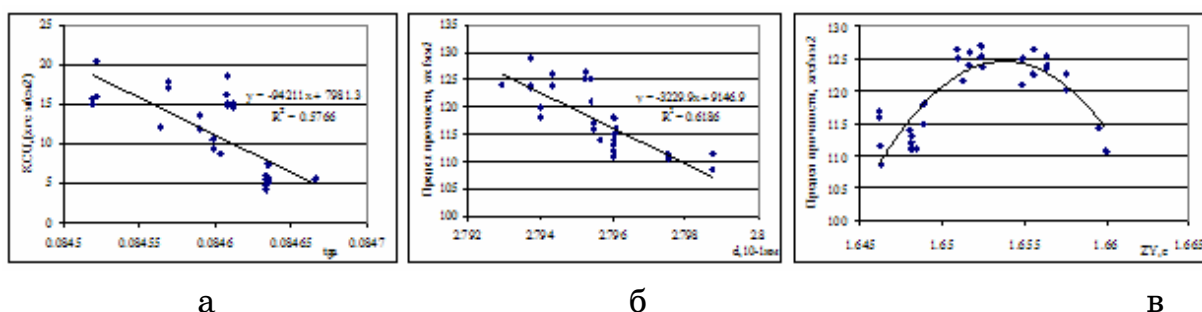


Рисунок 1 Зависимость механических свойств металлопродукции из стали марки 14X17H2 от параметров межатомного взаимодействия для круга диаметром 158 (ТО 3.1020°С-40'м.О.350°С -1ч. воздух)

Для анализа влияния элементного состава следствий локализации процессов, результатом которых является формирование структуры и свойств стали, нами используется подход разделения общего состава на подсистемы [5]: общую, матричную, легирующую, микролегирующую и примесную. Основанием для отнесения элементов к той или иной подсистеме являются предварительные результаты анализа как корреляционной матрицы, так и факторного анализа. Выбор оптимальных соотношений элементов матричной [C, Mn, Si] и легирующей [Cr, Ni] подсистем осуществляется на основе метода многокритериальной оптимизации путем построения соответствующих картограмм в заданных координатных сечениях.

Таблица 1

Выборочный химический состав стали марки 14X17H2

№	C, %	Mn, %	Si, %	P, %	S, %	Cr, %	Ni, %
1	0,13	0,35	0,28	0,027	0,006	17,06	1,57
2	0,13	0,34	0,32	0,03	0,014	17,18	1,53
3	0,13	0,29	0,3	0,027	0,012	17,29	1,53
4	0,12	0,33	0,32	0,03	0,018	17,31	1,67
5	0,12	0,45	0,37	0,03	0,005	17,42	1,54

W-(0,02-0,25);V(0,02/0,08);Mo(0,04/0,21);Nb(0,010/0,026)

Таблица 2

Интегральные параметры и механические свойства
стали выборочных плавов

№	Z^Y, e	$d, \text{HМ}^{10}$	tga	$Z^Y_{(W,V,Nb,Mo),e}$	$d_{(W,V,Nb,Mo), \text{HМ}^{10}}$	$\sigma_B, \text{кгс/мм}^2$	$\sigma_T, \text{кгс/мм}^2$	$\delta, \%$	$\Psi, \%$	КСУ, кгс/мм^2
1	1,647	2,795	0,0846	2,717	3,107	115	90	19	60	6,2
2	1,650	2,795	0,0845	2,614	3,088	113,0	88	20	64,0	8,6
3	1,651	2,794	0,0845	2,724	3,104	116,0	91	18	61,5	7,3
4	1,655	2,796	0,0846	2,672	3,097	118,0	93	23	64,0	10,5
5	1,658	2,795	0,0845	2,727	3,102	114,0	89	20	64,0	10,3

Как следует из картограмм (рис.2), в областях ограничений (заштрихованных) обеспечивается следующий уровень свойств: предел прочности – 119-123 (кгс/мм^2), предел текучести -89-97 (кгс/мм^2), ударная вязкость -8-14 (кгс м/см^2), относительное удлинение (%) – 20-23, относительное сужение (%) -61-67.

Таким образом, решение задачи оптимизации потребительских свойств стали сводится к обеспечению заданного сочетания модельных параметров для разных подсистем ее химического состава.

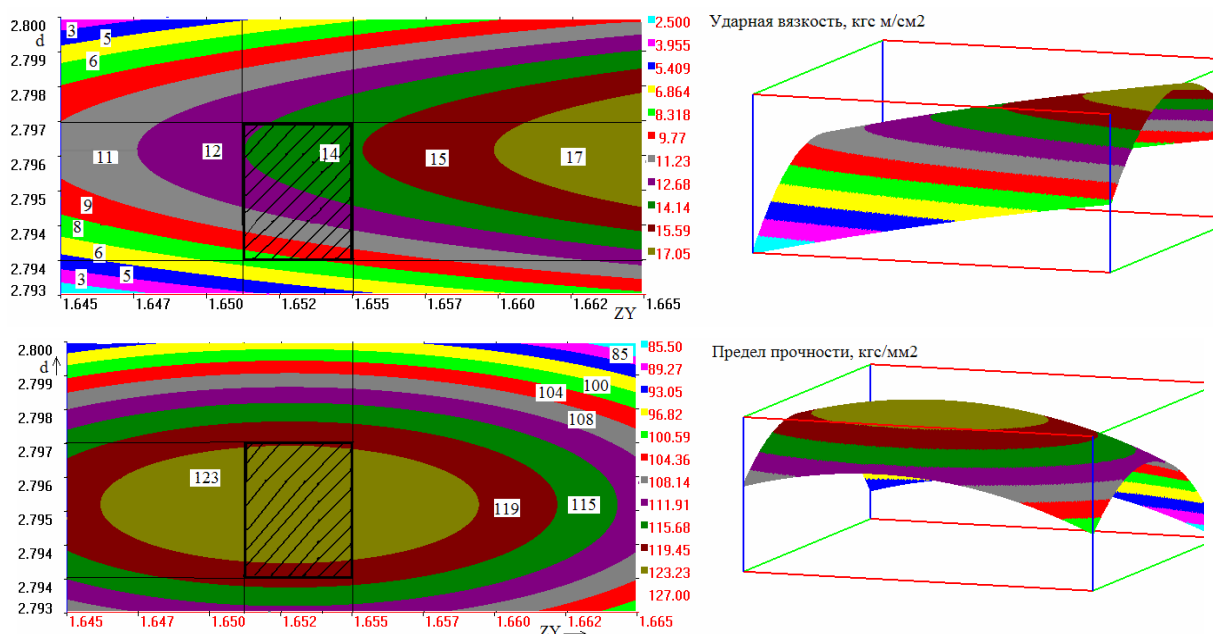


Рисунок 2 - Зависимость механических свойств металлопродукции из стали 14X17H2 для сортамента 20-78 мм диаметром, от параметров межатомного взаимодействия Z^Y (e) зарядового и структурного $d(10^{-1}\text{нм})$ состояния

Учитывая высокую информативность интегральных параметров примесно-микролегирующей подсистемы зарядового и структурного состояния $[r_{xy} \geq -0,6]$, особое внимание уделено исследованию влияния именно этой подсистемы (табл.3). На рисунке 3 показано влияние параметра зарядового состояния этой подсистемы на ударную вязкость. Чем меньше значения $Z^Y_{(W,V,Nb,Mo)}$, тем выше показатели ударной вязкости и прочностных свойств.

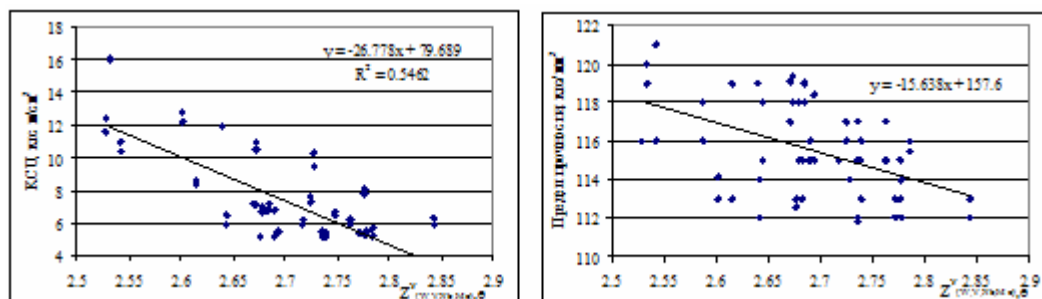


Рисунок 3 – Взаимосвязь параметра зарядового состояния для подсистемы [W, V, Nb, Mo] на ударную вязкость и предел прочности для стали 14X17H2, 3.1020°C-40'м.О.350°C -1ч. воздух для круга диаметром 46мм

Парные связи механических свойств стали 14X17H2 с химическим составом и параметрами межатомного взаимодействия

	σ_B	σ_T	δ	ψ	КСУ
W	-0.24	-0.23	-0.18	-0.45	-0.42
V	-0.24	-0.23	0.05	-0.20	-0.08
Mo	-0.20	-0.20	-0.06	-0.25	-0.33
Nb	-0.26	-0.26	0.04	-0.44	-0.49
$Z^Y_{(W,V,Nb,Mo)}$	-0.14	-0.14	-0.16	-0.6	-0.66
$d_{(W,V,Nb,Mo)}$	-0.18	-0.18	-0.11	-0.41	-0.63
$tg_{(W,V,Nb,Mo)}$	-0.018	-0.014	0.23	0.25	0.46

Компенсировать вредное влияние примесно-микролегирующей подсистемы можно при помощи корректировки элементов матричной подсистемы, а также режима термообработки, (рис.4). Такой подход нами использован применительно к сталям марок S355G2, 16MnCrS5, S235G производства РУП «БМЗ»[6,7].

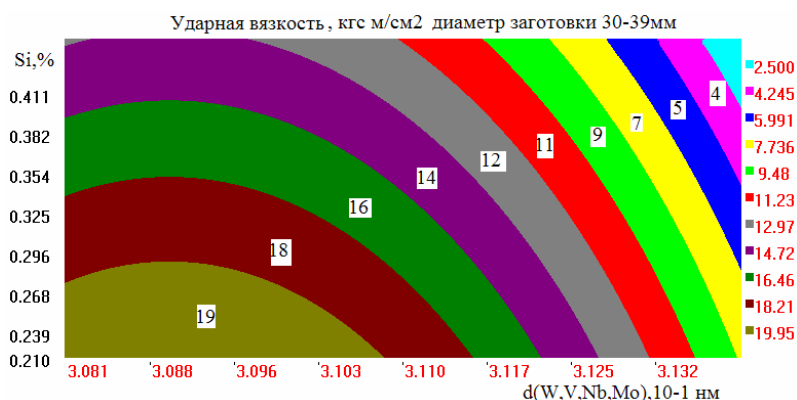


Рисунок 4 - Влияние примесно-микролегирующей подсистемы (W,V,Nb,Mo) и содержания кремния на изменение механических свойств металлопродукции из стали 14X17H2 (числа на изолиниях значения КСУ)

Выводы. 1. На примере состава стали 14X17H2 показана методика «свертки» химического состава стали, как единой физико-химической системы, позволяющая учитывать как свойства отдельных элементов, так и результаты их взаимодействия и научно обосновать рациональные пределы изменения элементного состава в пределах марки.

2. На основе физико-химической модели структуризации расплава выявлена роль примесно-микролегирующей подсистемы в формировании механических свойств стали. Получены закономерности, позволяющие выполнить оценку степени ее влияния на механические свойства стали и внести соответствующие коррективы за счет элементов матричной подсистемы и изменения режима термообработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г.Г.Ефименко, И.Г. Михеева, В.Н. Нецадим, Н.И. Цымбал. Сталь и альтернативные материалы: анализ и прогноз. Днепропетровск: НМетАУ. 1997.-53с.
2. Інтерв'ю за підсумками 2014 року/
<http://www.nas.gov.ua/UA/news/Pages/contents>.
3. Приходько Э. В. Эффективность комплексного легирования стали и сплавов/ Э. В. Приходько. Киев: Наукова думка.-1995.-292 с.
4. Приходько Э.В., Тогобицкая Д.Н., Головкин Л.А. Концептуальные основы прикладной теории комплексного легирования //Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. – Вып.13. -2006. –С.162-165.
5. Приходько Е.В., Тогобицька Д.М., Козачок О.С. Інформаційно-аналітична система стабілізації властивостей прокату // Металознавство та обробка металів. – Київ. – 2011. -№1. – С.39-43.
6. Международная научно-техническая конференция «Металлургия и литейное производство 2007. Беларусь» Разработка методики физико-химического моделирования закономерностей изменения свойств горячекатаного крупносортового проката в зависимости от содержания химических элементов. с.184-186
7. Патент на винахід №95729. Спосіб доведення хімічного складу сталі в ковші.