



УДК 669.1

**APPLICATION OF STATISTICAL ANALYSIS FOR THE OPTIMIZATION
OF LOW ALLOY STEEL COMPOSITION**
**ПРИМЕНЕНИЕ СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ СОСТАВА
НИЗКОЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ**

Gabelchenko N.I. / Габельченко Н.И.*PhD., assoc. Prof. / к.т.н., доц***Kanatov N.S. / Канатов Н.С.***B.Sc VSTU / студент ВолгГТУ*

*Volgograd State Technical University, 400005, Russia, Volgograd, Lenin Avenue 28,
Волгоградский Государственный Технический Университет,
400005, Россия, Волгоград, пр. им. Ленина 28*

Аннотация. В работе была проведена оптимизация химического состава низколегированной стали методами статистического анализа. В исследовании применялся анализ корреляционных матриц, а также множественный регрессионный анализ. Были построены зависимости механических свойств от химического состава стали. Были выявлены химические элементы, которые оказывают наибольшее влияние на механические свойства стали 09Г2С.

Ключевые слова: низколегированные стали, оптимизация состава, механические свойства стали, анализ корреляционных матриц, множественный регрессионный анализ, парный коэффициент корреляции.

Вступление.

На сегодняшний день одной из актуальных проблем является повышение уровня механических свойств стали путем оптимизация химического состава в пределах одной марки, при этом повышаются верхние пределы механических свойств без дополнительного введения дорогостоящих легирующих добавок. С развитием средств вычислительной техники появилась возможность обрабатывать большие массивы экспериментальных данных за непродолжительное время, поэтому методы статистического анализа с успехом применяются для этих целей. Чаще всего используют однофакторные зависимости каждого свойства от конкретного элемента. Но в сплаве действие элементов химического состава не является адитивным, поэтому целесообразно строить многофакторные зависимости и анализировать совместное влияние поэлементного состава стали на ее свойства.

В настоящей работе проводился анализ корреляционных матриц и моделирование многофакторных процессов.

Основной текст работы.

В данной работе проводилась оптимизация химического состава стали 09Г2С с помощью статистических методов.

Для выявления значимых коэффициентов корреляции использовался анализ корреляционных матриц [1] на основе данных 176 плавов. По этим данным рассчитывались парные коэффициенты корреляции между свойствами и факторами (легирующими элементами) по формуле (1):



$$r_{xy} = \frac{K_{xy}}{S_x S_y} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 (y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

где x_i и y_i - значения i -того факторов и свойств; \bar{x} и \bar{y} – средние значения факторов и свойств; K_{xy} – выборочная ковариация; S_x и S_y - выборочная дисперсия.

Результаты расчета корреляционной матрицы между свойствами и факторами приведены в таблице 1.

В (табл.1) жирным шрифтом выделены значимые коэффициенты корреляции. Находились эти коэффициенты путем сравнения значений парных коэффициентов корреляции с критическим значением парного коэффициента корреляции $r_{\alpha/2, \nu}^* = 0,148$ с уровнем значимости $\alpha = 0,05$ и числом степеней свободы $\nu = n - 2 = 174$ (n – число плавков).

Далее методикой работы предусматривалось построение зависимостей механических свойств от содержания легирующих элементов в виде многофакторной модели, рассчитанной с помощью множественного регрессионного анализа [2], с учетом значимых коэффициентов корреляции.

Таблица 1

Корреляционная матрица факторы - свойства

	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	Al
σ_T	0,284	0,168	0,183	0,067	-0,029	-0,125	-0,126	0,0128	-0,066	-0,311
σ_B	0,246	0,183	0,210	0,087	-0,013	-0,119	-0,12	0,0004	-0,069	-0,223
δ	-0,123	0,058	0,373	0,008	-0,044	-0,215	-0,215	-0,249	0,040	0,139
KCU	0,291	0,047	0,324	0,202	0,039	0,056	0,056	0,262	-0,008	-0,089

Авторская разработка

Уравнение зависимости механических свойств от химического состава имеет вид:

$$Y = b_0 + b_1 \times x_1 + b_2 \times x_2 + b_3 \times x_3 + b_4 \times x_4 + b_5 \times x_5 + b_6 \times x_6 + b_7 \times x_7 + b_8 \times x_8 + b_9 \times x_9 + b_{10} \times x_{10} \quad (2)$$

где Y – наиболее важный показатель исследуемого процесса – механические свойства (предел текучести σ_T , предел прочности σ_B , относительное удлинение δ и ударная вязкость KCU); x_i – факторы процесса – содержание элементов (углерод [C], марганец [Mn], кремний [Si], фосфор [P], сера [S], хром [Cr], никель [Ni], медь [Cu], молибден [Mo], алюминий [Al]), влияющие на показатель процесса Y



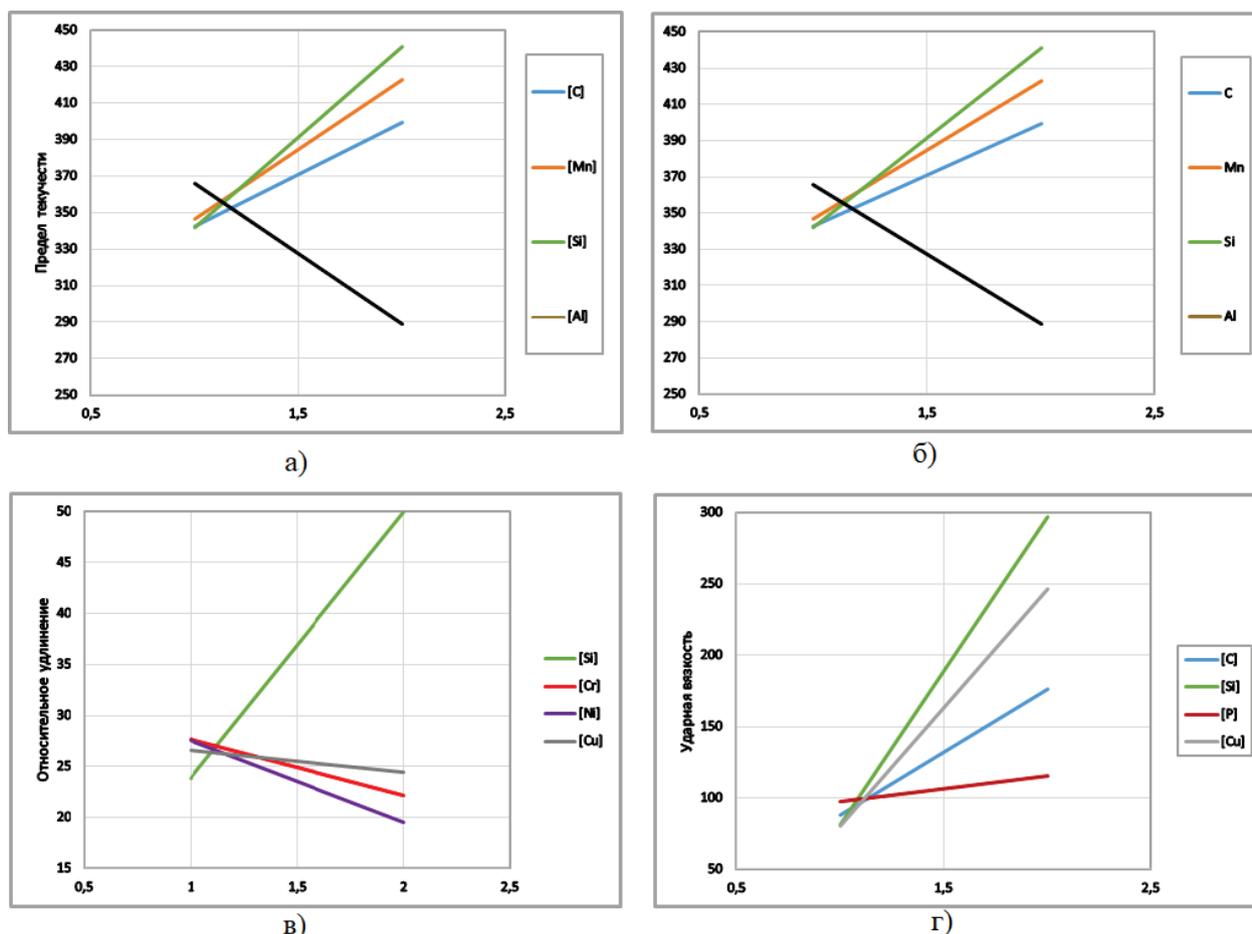
Описание многофакторного процесса в виде регрессионной модели позволяет получить три важных следствия:

- качественно оценить влияние содержания химического элемента на то или иное механическое свойство можно по величине коэффициентов b_i ;
- прогнозировать процесс по содержанию того или иного химического элемента можно в каждом конкретном случае;
- по полученной регрессионной модели можно оптимизировать исследуемый процесс.

Уравнение зависимости предела текучести от химического состава стали 09Г2С имеет вид:

$$\sigma_m = 210,1266 + 404,4007 \times [C] + 45,30428 \times [Mn] + 124,6598 \times [Si] - 276,167 \times [P] + 697,6645 \times [S] + 42,09853 \times [Cr] - 209,505 \times [Ni] + 113,5682 \times [Cu] + 4718,898 \times [Mo] - 2403,51 \times [Al]$$

Влияние химических элементов состава на предел текучести стали 09Г2С с учетом парных коэффициентов корреляции представлены на рисунке 1, а.



Авторская разработка

а) зависимость предела текучести; б) зависимость предела прочности; в) зависимость относительного удлинения; г) зависимость ударной вязкости.

Рис.1. «Зависимости механических свойств от максимума и минимума значения химического состава стали 09Г2С»



Уравнение зависимости предела прочности от химического состава стали 09Г2С имеет вид:

$$\sigma_g = 275,078 + 368,718 \times [C] + 78,3461 \times [Mn] + 159,751 \times [Si] - 188,113 \times [P] + 926,198 \times [S] + 73,3086 \times [Cr] - 228,919 \times [Ni] + 136,779 \times [Cu] + 4739,67 \times [Mo] - 973,473 \times [Al]$$

Влияние химических элементов состава на предел прочности стали 09Г2С с учетом парных коэффициентов корреляции представлены на рисунке 1, б.

Уравнение зависимости относительного удлинения от химического состава стали 09Г2С имеет вид:

$$\delta = -5,9457 - 60,1071 \times [C] + 13,657 \times [Mn] + 32,8353 \times [Si] + 19,1824 \times [P] + 80,9189 \times [S] - 16,6275 \times [Cr] - 30,4761 \times [Ni] - 7,19201 \times [Cu] + 1089,43 \times [Mo] + 190,173 \times [Al]$$

Влияние химических элементов состава на относительное удлинение стали 09Г2С с учетом парных коэффициентов корреляции представлены на рисунке 1, в.

Уравнение зависимости ударной вязкости от химического состава стали 09Г2С имеет вид:

$$KCU = -308,213 + 623,569 \times [C] + 33,1925 \times [Mn] + 271,095 \times [Si] + 427,757 \times [P] + 1091,44 \times [S] + 40,6777 \times [Cr] - 130,044 \times [Ni] + 557,497 \times [Cu] + 3705,79 \times [Mo] + 0482,03 \times [Al]$$

Влияние химических элементов состава на ударную вязкость стали 09Г2С с учетом парных коэффициентов корреляции представлены на рисунке 1, г

Из (рис.1) следует, что для повышения прочностных характеристик стали 09Г2С необходимо поддерживать содержание углерода, марганца и кремния на верхнем пределе, а алюминия на нижнем пределе химического состава. Для повышения пластических характеристик стали 09Г2С необходимо поддерживать содержание кремния на верхнем пределе химического состава.

Таким образом с помощью статистических методов была проведена оптимизация химического состава стали 09Г2С для повышения уровня механических свойств.

Заключение и выводы.

Была проведена оптимизация состава стали 09Г2С с применением анализа корреляционных матриц и множественного регрессионного анализа на основе данных 176 плавок.

Были выявлены химические элементы, оказывающие наибольшее влияние на механические свойства стали 09Г2С.

Литература:

1. Мельниченко, А. С. Статистический анализ в металлургии и материаловедении : учебник / А. С. Мельниченко. – М. : Изд. Дом МИСиС,



2009. – 268 с. ISBN: 978-5-87623-258-8

2. Бланк, Е., Маржери, И. Статистические методы обработки данных в литейных процессах / Е. Бланк, И. Маржери. – 28 МКЛ. – Вена. – М. : Машгиз, 1964.

References:

1. Melnichenko, A. S. Statistical analysis in metallurgy and materials science : textbook / A. S. Melnichenko. - M.: Ed. House MISiS, 2009. - 268 p. ISBN: 978-5-87623-258-8
2. Form, E., Margery, I. Statistical methods of data processing in casting processes / E. Form, I. Margery. - 28 ML. – Vienna. - Moscow: Mashgiz, 1964.

Abstract. *The optimization of the chemical composition of low-alloy steel by statistical analysis methods is considered. The analysis of correlation matrix, as well as multiple regression analysis is used. Dependences of mechanical properties on chemical composition were constructed. Chemical elements that have the greatest impact on the mechanical properties of 09G2S steel were identified.*

Key words: *low alloy steels, optimization of composition, mechanical properties of steel, correlation matrix analysis, multiple regression analysis, pair correlation coefficient.*

Статья отправлена: 10.06.2018 г.

© Канатов Н.С.