

УДК 669.15-194

Канд. техн. наук С. П. Шейко

Запорожский национальный технический университет, г. Запорожье

КОМПЛЕКСНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА НИЗКОЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ

В работе проанализировано влияние хрома, ванадия и титана на механические свойства стали с использованием статистического метода планирования активного эксперимента. Установлено закономерности изменения механических свойств от легирующих элементов. Рекомендованный оптимальный химический состав стали.

Ключевые слова: низколегированная сталь, легирующие элементы, химический состав, механические свойства, методы планирования.

Задание комплексной оптимизации заключалось в исследовании влияния состава стали на механические свойства низколегированной стали с целью выбора его оптимального химического состава.

Параметры оптимизации:

Y_1 – предел прочности (σ_B), МПа;

Y_2 – предел текучести (σ_T), МПа;

Y_3 – ударная вязкость (КСУ), МДж/м²;

Y_4 – относительное удлинение (δ_5), %.

В качестве независимых переменных были выбраны: содержание в стали хрома (X_1), содержание в стали ванадия (X_2), содержание в стали титана (X_3). В процессе поиска оптимального состава сплава по изобретению, в индукционной печи с основной футеровкой емкостью 50 кг были проведены лабораторные плавки стали. Полученные отливки ковали на заготовки размером 10×80×120 мм, с последующей прокаткой в горячем состоянии.

Очень важно правильно выбрать диапазон изменения факторов. Чем уже диапазон, тем проще и точнее формула, которая будет получена после обработки результатов эксперимента. Для структуры матрицы особого значения не имеет, равномерно ли возрастают уровни факторов. Однако для упрощения графического оформления результатов предпочтительно равномерное возрастание уровней. После выбора интервалов и уровней изменения факторов эти данные свели в таблицу 1. Для сокращения числа опытов и предполагая нелинейный характер функций отклика в работе использовали симметричный композиционный план второго порядка [1].

Выбор основного уровня и интервалов варьирования проводился исходя из того, что содержание углерода должно быть в диапазоне 0,08–0,12 масс. %. Это обусловлено: нижняя граница – резким снижением прочностных; верхняя – является пределом, за которой начинается массовое выделение охрупчивающих вторичных фаз, снижает

пластичность сплава. Содержание кремния должно быть в диапазоне 0,10–0,50 масс. %. Это обусловлено: нижняя граница – обеспечением содержания кремния, который необходим для начала процесса раскисления; верхняя – снижением показателей пластичности при выходе за указанный предел.

Содержание марганца должно быть в диапазоне 0,15–0,50 масс. %. Это обусловлено: нижняя граница – ограниченной необходимостью обеспечения процесса раскисления и десульфурации сплава; верхний предел – резким увеличением количества перлитной составляющей в стали.

Содержание хрома должно быть в диапазоне 0,05–0,15 масс. %. Это обусловлено необходимостью обеспечения образования карбидов в широком интервале температур, что немаловажно в процессе сварки.

Содержание ванадия должно быть в диапазоне 0,05–0,15 масс. %. Это обусловлено: нижняя граница – ограниченной достаточной его концентрации для воздействия на структуру и свойства сплава; верхний предел – эффективностью его полезного действия по торможению образования карбидов и нитридов железа.

Содержание титана должно быть в диапазоне 0,05–0,15 масс. %. Это обусловлено снижением показателей пластичности и ударной вязкости, благодаря предупреждению образования нитридов, при выходе за указанный предел.

Дальнейшая обработка экспериментальных данных, связанная с оптимизацией химического состава, проводилась при помощи пакета прикладных программ «Statistica 6.0», позволяющего повысить эффективность исследований в несколько раз.

Численные значения коэффициентов регрессии и их значимость, определенные с учетом различия дисперсий для каждой функции отклика, а также проверка значимости по критерию Стьюдента и оценка адекватности модели по критерию Фишера представлены в таблице 2.

Таблица 1 – Исследуемые факторы

Характеристика	Факторы		
	Cr, % масс.	V, % масс.	Ti, % масс.
Код	X ₁	X ₂	X ₃
Основной уровень	0,15	0,15	0,15
Интервал варьирования	0,05	0,05	0,05
Нижний уровень	0,10	0,10	0,10
Верхний уровень	0,20	0,20	0,20

Таблица 2 – Проверка результатов регрессивного анализа на значимость и адекватность

Параметр	Функции отклика			
	Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₄
Δb	2,55	2,55	0,015	0,25
t-критерий	2,78	2,78	2,78	2,78
F-критерий	6,09 > 4,39	6,26 > 5,61	6,16 > 4,88	6,26 > 4,79

В результаты регрессивного анализа, были получены ряд уравнений, показывающие зависимость механических свойств стали от содержания легирующих элементов.

В результате расчетов были получены следующие уравнения:

$$Y_1 = 406,4 + 42,1 X_1 + 13,5 X_2 + 3,06 X_3 + 58,06 X_1^2 - 0,72 X_2^2 - 23,5 X_3^2 + 10,5 X_1 X_2 + 10,5 X_1 X_3 + 10,5 X_2 X_3; \quad (1)$$

$$Y_2 = 324,5 + 56,4 X_1 + 19,3 X_2 + 7,3 X_3 + 82,5 X_1^2 - 5,4 X_2^2 - 27,6 X_3^2 + 7,25 X_1 X_2 + 7,25 X_1 X_3 + 7,25; \quad (2)$$

$$Y_3 = 0,79 - 0,023 X_1 - 0,029 X_2 - 0,025 X_3 - 0,08 X_1^2 - 0,003 X_2^2 + 0,03 X_3^2 + 0,02 X_1 X_2 - 0,025 X_1 X_3 - 0,010; \quad (3)$$

$$Y_4 = 29,3 - 0,17 X_1 - 1,32 X_2 - 0,81 X_3 - 3,02 X_1^2 + 0,03 X_2^2 + 0,88 X_3^2 + 1,83 X_1 X_2 - 0,54 X_1 X_3 + 0,41. \quad (4)$$

Коэффициенты, абсолютная величина которых равна доверительному интервалу Δb или больше его, следует признать статистически значимыми. Статистически незначимые коэффициенты (в данном случае b₅ – уравнения (1), b₅, b₉ – (3), b₅ – (4) из моделей можно исключить.

Проверка адекватности моделей показывает, что их можно использовать для прогнозирования значений функций отклика при любых зна-

чениях факторов, находящихся между верхним и нижним уровнями. Для этого целесообразно перейти к натуральным переменным, описывающим влияние содержания легирующих элементов на предел прочности, предел текучести, относительное удлинение и ударную вязкость стали:

$$\sigma_B = 824 - 7385Cr - 991V + 1627Ti + 23222Cr^2 - 9417Ti^2 + 4200CrV + 4200CrTi + 4200VTi; \quad (5)$$

$$\sigma_T = 716 - 9636Cr + 162V + 2586Ti + 32983Cr^2 - 2153V^2 - 11033Ti^2 + 2900CrV + 2900CrTi + 2900VTi; \quad (6)$$

$$KCU = 0,52 + 9,52Cr - 1,63V - 2,67Ti - 31,78Cr^2 + 12,22Ti^2 + 7,0CrV - 10,0CrTi; \quad (7)$$

$$\delta_5 = 32 + 280Cr - 161V - 115Ti - 1206Cr^2 + 353Ti^2 + 735CrV - 215CrTi + 165VTi. \quad (8)$$

Для оценки адекватности уравнений был проведен расчет по полученным уравнениям регрессии для основного уровня химического состава стали. Результаты расчетов были сопоставлены с экспериментальными исследованиями. Как видно из таблицы 2 погрешность между расчетными и экспериментальными значениями функции отклика не превышает 2%.

С целью определения химического состава, обеспечивающего получение оптимальных механических свойств стали, строили трехмерные графические зависимости (рис. 1–4). Используя пакет прикладных программ MatLab 6.0, были построены трехмерные модели «тернарные графики», которые упрощают прослеживание зависимости между группой факторов и исследуемыми в данной работе механическими свойствами.

Прежде всего, отметим, что все соображения о направлении и силе влияния изученных факторов на механические свойства стали можно высказать только для выбранных в работе интервалов их изменения. В этих интервалах оказалось заметно слабым влияние на механические свойства содержание ванадия самого по себе, а также всех двойных эффектов, в которые входил ванадий. В целом, из всех изученных факторов содержание ванадия можно считать, пожалуй, самым слабо влияющим. Относительную силу влияния остальных эффектов легче всего представить себе на диаграммах (рис. 1–4).

Из анализа рисунков 1–4 видно, что наиболее сильно механические свойства стали зависят от содержания в стали хрома и титана. Заметно влияет соотношение между количеством хрома и титана. Представление результатов эксперимента полиномом второй степени оказалось оправданным — значительная часть нелинейных членов здесь значительно отличается от нуля. Поскольку нелинейные коэффициенты регрессии (1–4) имеют одинаковые знаки, поверхность отклика — эллипсоид, а ее центр — экстремум, причем максимум, так как коэффициенты регрессии отрицательны.

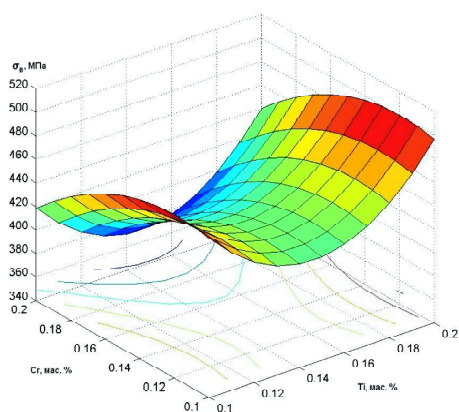


Рис. 1. Оптимизация химического состава стали по пределу прочности (σ_B)

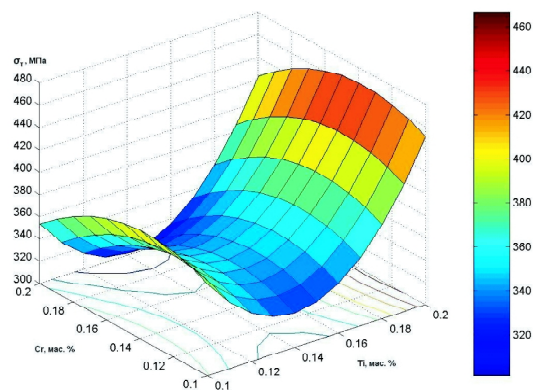
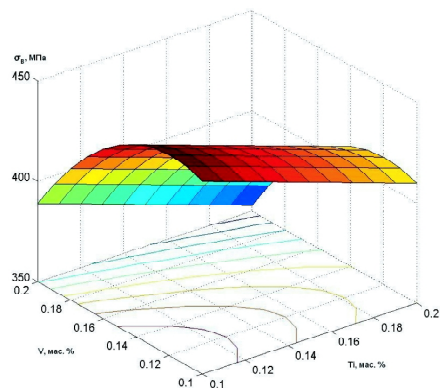


Рис. 2. Оптимизация химического состава стали по пределу текучести (σ_T)

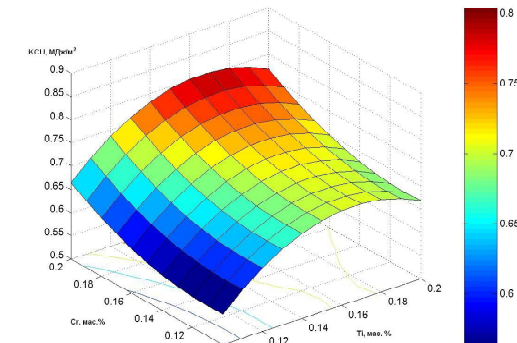
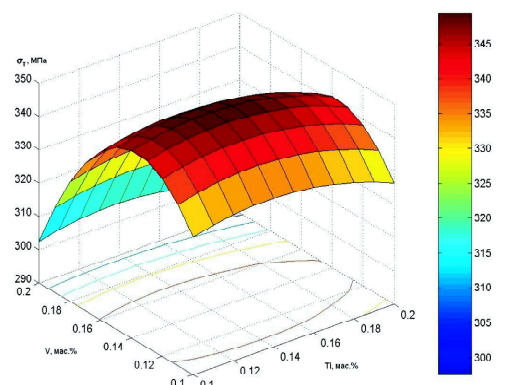


Рис. 3. Оптимизация химического состава стали по ударной вязкости

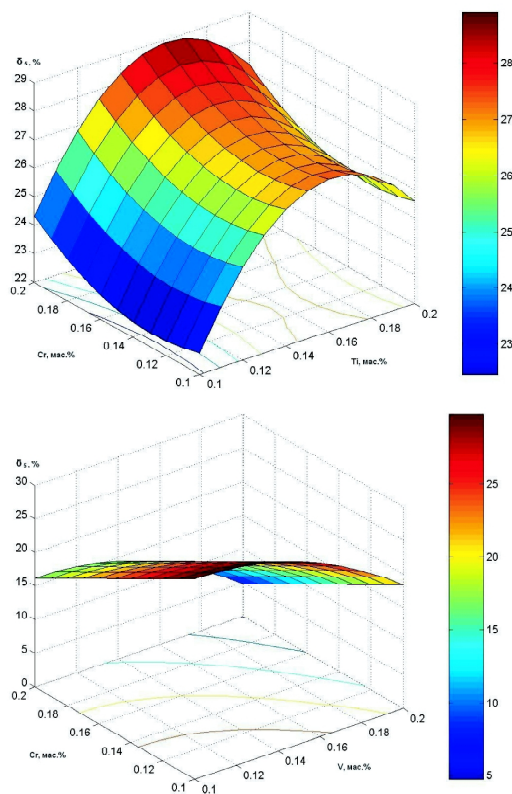


Рис. 4. Оптимизация химического состава стали по относительному удлинению

Вывод

Метод планирования эксперимента был обработан с помощью пакета прикладных программ, в результате чего был получен оптимальный химический состав низколегированной стали, мас. %: углерод – 0,10%, кремний – 0,31%, хром – 0,1%, ванадий – 0,13%, титан – 0,12%. На разработанный химический состав стали был получен патент Украины [2].

Список литературы

1. Новик Ф. С. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов / Ф. С. Новик, Я. Б. Арсов. – М. : Машиностроение; София : Техника, 1980. – 304 с.
2. Позитивний висновок № 3872/3А/14, Україна, МПК С22 С38/28 (2006.1), Міщенко В. Г., Беліков С. Б., Шейко С. П. та ін., замовник ЗНУ а 2013 09313.

Поступила в редакцию 26.03.2014

Шейко С.П. Комплексна оптимізація хімічного складу низколегованої сталі

В роботі проаналізовано вплив хрому, ванадію і титану на механічні властивості сталі з використанням статистичного методу планування активного експерименту. Встановлено закономірності зміни механічних властивостей від легуючих елементів. Рекомендований оптимальний хімічний склад сталі.

Ключові слова: низколегована сталь, легуючі елементи, хімічний склад, механічні властивості, методи планування.

Sheyko S. Integrated optimization of chemical composition low alloy steel

Influence of chrome, vanadium and titan on mechanical properties became with the use of statistical method of planning of active experiment is analysed. Conformities to law of change of mechanical properties are set from alloying elements. Recommended optimal chemical composition became.

Key words: low-alloy steel, alloying elements, chemical composition, mechanical properties, methods of planning.