

ский, А.В. Крыленко // Вестник Полоцкого гос. ун-та. – 2005. – № 10. – С. 133–137.

6. Назарова, Н.М. Исследование механизмов релаксации внутренних напряжений в стенке резервуара и их влияния на развитие процессов разрушения / Н.М. Назарова: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.01 / Н.М. Назарова. – Уфа: УГНТУ, 2000. – 24 с.

УДК [669.14:001.891.5]:519.2

Ф.И. ПАНТЕЛЕЕНКО, д-р техн. наук,
Е.С. ГОЛУБЦОВА, д-р техн. наук (БНТУ)
Н.Б. КАЛЕДИНА (БГТУ)

ОПТИМИЗАЦИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА И СТРУКТУРЫ СТАЛИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТАТИСТИЧЕСКОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Обеспечение несущей способности конструкций или детали может быть достигнуто различными способами – легированием, способом выплавки стали, термообработкой и др., причем свойства стали могут существенно изменяться даже от плавки к плавке.

В данной работе рассматривалось влияние пяти факторов (содержание Nb, C, Mn, и Si, плавки А и В) на такие параметры оптимизации, как предел текучести ($y_1 = \sigma_0$, МПа); энергия разрушения ($y_2 = W_c$, МДж/м³), коэффициент вязкости разрушения ($y_3 = K_{Ic}$, МПа·м^{0,5}), L -критерия (y_4) и обобщенного показателя D (y_5) с целью повышения прочностных и пластических свойств стали.

Для проведения эксперимента был выбран дробный факторный план $N = 2^{5-2}$, где N – число опытов (строк в матрице плана), 5 – число факторов, 2 – число уровней факторов и два незначимых взаимодействия факторов, вместо которых вводятся факторы $x_5 = x_1 x_2 x_3$ и $x_4 = x_2 x_3$.

Для определения дисперсии параметров оптимизации в каждой строке матрицы проводились три параллельных опыта ($n = 3$). Во избежание систематических ошибок опыта проводились в случайном порядке, L -критерий рассчитывался по формуле [1]:

$$L = \left\{ \left(1 - \frac{\sigma_{\delta}}{\sigma_{\delta}^{\max}} \right)^2 + \left(1 - \frac{W_c}{W_c^{\max}} \right)^2 + \left(1 - \frac{K_{1c}}{K_{1c}^{\max}} \right)^2 \right\}^{0.5}, \quad (1)$$

где σ_{δ}^{\max} , W_c^{\max} , K_{1c}^{\max} – экстремальные значения предела текучести (1900 МПа); предельная плотность энергии деформации – 3364 МДж/м³, при достижении которой возникают неравновесные фазовые переходы в зоне предразрушения и коэффициента вязкости разрушения – 121 МПа·м^{0,5}.

Обобщенный параметр оптимизации D рассчитывался по формуле [2]

$$D = \sqrt[n]{d_1 \cdot d_2 \cdot d_3 \cdot \dots \cdot d_n}, \quad (2)$$

где $d_1, d_2 \dots d_n$ – частные функции желательности, определяемые, в свою очередь по формуле

$$d_i = e^{-e^{-y'_i}} \text{ или } = \exp[-\exp(-y'_i)], \quad (3)$$

где e – основание натурального логарифма, а y'_i – кодированное значение уровня i – го параметра оптимизации.

Предел текучести σ_T и K_{1c} определялись по стандартной методике [3], а W_c – по стандартной методике, приведенной в работе [1].

Матрица плана $N = 2^{5-2}$ и результаты эксперимента приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Матрица плана $N = 2^{5-2}$ и результаты эксперимента

N	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	$y_1 = \sigma_T$	$y_2 = W_c$	$y_3 = K_{1c}$	$y_4 = L$	$y_5 = D$
1	-	-	-	+	-	186	596	97,0	1,237	0,312
2	+	-	-	+	+	240	661	81,1	1,232	0,534
3	-	+	-	-	+	255	647	77,2	1,238	0,518
4	+	+	-	-	-	206	627	102,0	1,217	0,471
5	-	-	+	-	+	258	712	85,0	1,207	0,680
6	+	-	+	-	-	203	658	107,0	1,208	0,511
7	-	+	+	+	-	200	638	103,8	1,215	0,471
8	+	+	+	+	+	247	670	80,0	1,230	0,589

В этой таблице x_1, x_2, x_3, x_4 и x_5 – кодированные уровни факторов (единица опущена, т.е. вместо $x_1 = +1$ пишем $x_1 = +$). Их уровни приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Факторы и их уровни

Факторы Уровни	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
	Nb	C	Mn	Si	Плавка
Верхний (+1)	1	0,19	0,50	0,28	Б
Нижний (-1)	0	0,12	0,23	0,20	А
Интервал варьирования	0,5	0,035	0,135	0,04	-
Основной (0)	0,5	0,155	0,365	0,24	-

После статистической обработки результатов эксперимента и проверки значимости коэффициентов уравнения по методике [2] получены адекватные модели:

$$y_1 = \sigma_T \text{ (МПа)} = 224,5 + 3x_2 + 2,5x_3 - 6,3x_4 + 25,8x_5; \quad (4)$$

$$y_2 = W_c \text{ (МДж/м}^3\text{)} = 651,1 + 18,4x_3 - 10,4x_4 + 21,4x_5; \quad (5)$$

$$y_3 = K_{1c} \text{ (МПа} \cdot \text{м}^{0,5}\text{)} = 91,6 + 2,3x_3 - 1,2x_4 - 10,8x_5; \quad (6)$$

$$y_4 = L = 1,223 - 0,008x_3. \quad (7)$$

Анализ уравнений (4)–(6) показывает, что наибольшее влияние на механические свойства данной стали оказывает x_5 . Плавка Б ($x_5 = +1$) увеличивает предел текучести σ_T и предельную плотность энергии деформации W_c , но уменьшает коэффициент вязкости разрушения K_{Ic} . Изменение энергии деформации $W_c(y_2)$ и вязкости разрушения $K_{Ic}(y_3)$ от содержания марганца (x_3), кремния (x_4) и вида плавки (x_5) представлено на рисунках 1 и 2.

Большое влияние на σ_T и W_c оказывает содержание Si (x_4). С его увеличением оба параметра уменьшаются. Максимальный предел текучести $y_1 = \sigma_0 = 258$ МПа получен при $x_1 = -1$, $x_2 = -1$, $x_3 = +1$, $x_4 = -1$ и $x_5 = +1$, т.е. при плавке Б и содержании 0 % Nb; 0,12 % C; 0,50 % Mn; 0,20 % Si (см. опыт 5).

Максимальная величина $W_c = y_2 = 712$ МДж/м³ получена при тех же условиях, а максимальная величина $y_3 = K_{Ic} = 107$ МПа·м^{0,5} получена в условиях опыта 6 ($x_1 = +1$; $x_2 = -1$; $x_3 = +1$; $x_4 = -1$; $x_5 = -1$), т.е. 1 % Nb; 0,12 % C; 0,50 % Mn; 0,20 % Si (плавка А).

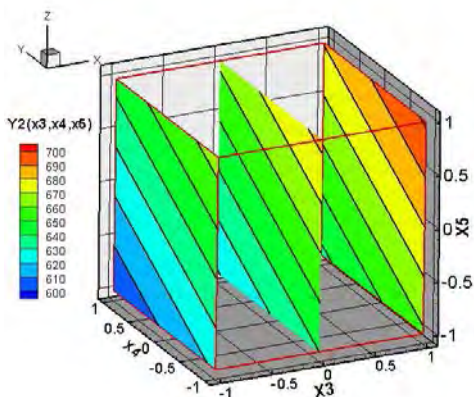


Рисунок 1 – Графическое представление изменения энергии деформации $W_c(y_2)$ от содержания марганца (x_3), кремния (x_4) и вида плавки (x_5)

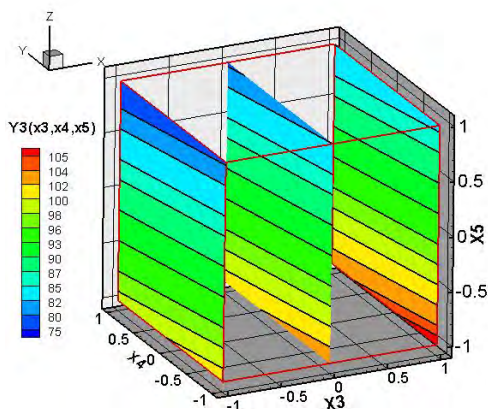


Рисунок 2 – Графическое представление изменения вязкости разрушения K_{1c} (y_3) от содержания марганца (x_3), кремния (x_4) и вида плавки (x_5)

Обращает на себя внимание тот факт, что добавка ниобия в пределах 0–1 % не оказывает существенного влияния на σ_T , W_c , K_{1c} и L , хотя в работе [1] утверждается, что легирование Ст.3 ниобием дает положительный эффект.

Ввиду противоречивого влияния факторов на σ_T , W_c и K_{1c} было принято решение найти оптимальные условия легирования стали с помощью обобщенного параметра оптимизации $D = \sqrt[3]{d_1 \cdot d_2 \cdot d_3}$, где d_1 , d_2 и d_3 – частные функции желательности для σ_δ , W_c и K_{1c} .

Для этого вначале построили шкалу желательности (таблица 3).

Таблица 3 – Шкала частных функции желательности

d_i	y_i	$y_1 = \sigma_T$, МПа	$y_2 = W_c$, МДж/м ³	$y_3 = K_{1c}$, МПа·м ^{0,5}
1,00–0,80	3,00	300	750	110
0,80–0,63	1,50	275	700	100
0,63–0,37	0,85	250	650	90
0,37–0,20	0,00	225	600	80
0,20–0,00	–0,50	200	550	70

В этой таблице $d_i = 1,00-0,80$ соответствует наилучшему результату; $(0,80-0,63)$ – хорошему; $(0,63-0,37)$ – удовлетворительному; $(0,37-0,20)$ – плохому и $(0,20-0,00)$ – очень плохому результату.

Пользуясь этой таблицей, построили график функции желательности, что позволяет рассчитать кодированные значения y'_i для данных таблицы 1, который представлен на рисунке 3.

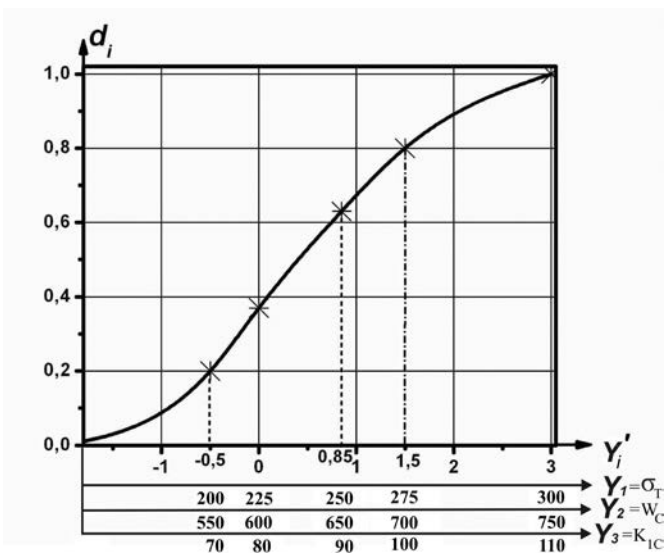


Рисунок 3 – График функции желательности

Проведя три параллельных оси $0 - y'$ прямых и нанеся из таблицы 3 желательные значения σ_{δ} , W_c и K_{1c} , рассчитаем для данных таблицы 1 величину y'_i и d_i . Результаты расчетов приведены в таблице 4.

Величину D рассчитывали по формуле (2), т. е. $D = \sqrt[3]{d_1 \cdot d_2 \cdot d_3}$. Как видно из таблицы 4, хорошее значение $D = 0,680$ получено только в опыте 5, т.е. при $x_1 = -1$, $x_2 = -1$, $x_3 = +1$, $x_4 = -1$ и $x_5 = +1$ (0 % Nb, 0,12 % C, 0,50 % Mn, 0,20 % Si плавка Б).

Таблица 4 – Значения y'_i и d_i для σ_δ , W_c и K_{1c}

$y_1 = \sigma_\tau$	y'_1	d_1	$y_2 = W_c$	y'_2	d_2	$y_3 = K_{1c}$	y'_3	d_3	D
186	-0,28	0,113	596	-0,040	0,353	97,0	1,305	0,762	0,312
240	0,51	0,549	661	0,993	0,690	81,1	0,094	0,402	0,534
255	0,98	0,686	647	0,799	0,638	77,2	-0,140	0,317	0,518
206	-0,38	0,232	627	0,459	0,532	102,0	1,800	0,848	0,471
258	1,06	0,707	712	1,860	0,856	85,0	0,425	0,520	0,680
203	-0,44	0,212	658	0,954	0,680	107,0	2,550	0,925	0,511
200	-0,50	0,200	638	0,646	0,592	103,8	2,070	0,881	0,471
247	0,75	0,623	670	2,100	0,885	80,0	0,000	0,370	0,589

Действительно, в этом случае $\sigma_0 = 258$ МПа, $W_c = 712$ МДж/м³, $K_{1c} = 85$ МПа·м^{0,5}.

Этим условиям соответствует и минимальная величина L -критерия ($L = 1,207$).

Для оценки механических и других свойств материала целесообразно использовать не только L -критерий, но и обобщенный параметр оптимизации D , дающий более объективную оценку условиям получения и структуры материала (сравним опыт 6, где $L = 1,208$, а $D = 0,511$).

Зависимость D от исследованных факторов выражается в виде

$$y_5 = D = 0,511 + 0,015x_1 + 0,052x_3 - 0,028x_4 + 0,07x_5. \quad (8)$$

Здесь также вид плавки (x_5) оказывает наибольшее влияние, затем следует содержание Mn (x_3), Si (x_4) и Nb (x_1).

Пользуясь данными таблицы 1, можно установить корреляционную зависимость между обобщенным показателем D и L -критерием в виде уравнения (поскольку коэффициент парной корреляции $r_{4,5} = -0,55 > r_{\epsilon\delta} = 0,4973$ при $\alpha = 0,005$ и $f = 16$):

$$y_5 = D = 6,090 - 4,562y_4. \quad (9)$$

Таким образом, можно сделать вывод о том, что наибольшее влияние на механические свойства и структуру стали 3 при легировании оказывает марганец (x_3). Влияние других элементов (Nb, C, Si) существенно меньше.

Для получения оптимальных свойств стали следует соблюдать условия опыта 5 (таблица 1), где $D = 0,68$, $\sigma_T = 258$ МПа, $W_c = 712$ МДж/м³, $K_{1c} = 85$ МПа·м^{0,5}.

Литература

1. Синергетика и фракталы в материаловедении / В.С. Иванова [и др.]. – М.: Наука, 1994. – 383 с.

2. Голубцова, Е.С. Основы научных исследований в порошковой металлургии и сварке: учебное пособие / Е.С. Голубцова, Б.А. Каледин, Н.Б. Каледина. – Минск: БНТУ, 2008. – 240 с.

УДК 669.041

В.М. КОНСТАНТИНОВ, д-р техн. наук,
П.С. ГУРЧЕНКО, д-р техн. наук,
Т.Н. СЕНИЧЕНКО (БНТУ),
А.И. МИХЛЮК, канд. техн. наук (ОАО «МАЗ»)

ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕЕ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ПОКОВОК ГРУЗОВОЙ АВТОТЕХНИКИ

Введение. Получение заданных свойств деталей автомобиля, адекватных условиям ее эксплуатации, всегда было актуальным, так как решение данной задачи позволяло получить равнопрочную конструкцию автомобиля, что является оптимальным как с технической, так и экономической стороны. Для деталей, которые в процессе изготовления подвергаются различным видам технологических операций, связанных с многократным нагревом, прогнозирование заданных свойств конечной детали следует начинать на самых первых стадиях ее изготовления. Одним из важнейших параметров, определяющих качество поковок, является формирование требуемой структуры металла, которое достигается предварительной термической обработкой.

В 2010 г. в кузнечном производстве ОАО «МАЗ» термической обработке подвергали поковки различной конфигурации и массой от 1 до 80 кг с годовым объёмом более 9000 т. Применяются в основном следующие виды термической обработки поковок:

– нормализация (для исправления крупнозернистой структуры послековки подвергаются поковки из углеродистых, среднелегированных и сложнелегированных сталей, подлежащих последующей цементации);