

значительно выше, чем у аналогичных изделий без специальных покрытий.

## Литература

1. Ситкевич, М.В. Совмещенные процессы химико-термической обработки с использованием обмазок / М.В. Ситкевич, Е.И. Бельский. – Минск: Выш. школа, 1987. – 156 с.

2. Григоров, П.К. Методика определения хрупкости борированного слоя / П.К. Григоров, Б.Б. Катханов // Повышение надежности и долговечности деталей машин: сб. научн. тр. – Ростов-на-Дону, 1972. – Вып. 16. – С. 97–98.

УДК 669.15+621.791.75

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

### **ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА КОНСТРУКЦИОННЫХ ЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ ПРИ АРГОННО-ДУГОВОЙ СВАРКЕ. СООБЩЕНИЕ 1. УСТАНОВЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ МЕЖДУ МЕХАНИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ И ТЕМПЕРАТУРОЙ**

Применение закаливающих сталей в сварных соединениях сопровождается рядом трудностей в процессе сварки. Они связаны с развитием малопластичных и хрупких участков в металле шва и ЗТВ, где металл перегревается при сварке выше температур  $A_{c1}$ , а при последующем охлаждении в структуре таких сталей, наряду с мартенситом с высокой плотностью несовершенств и упругих микрорискажений, обуславливающих возникновение локальных пиковых напряжений, дополнительно фиксируется и остаточный аустенит. Образование таких структур снижает сопротивляемость сварных соединений к разрушению под действием даже незначительных нагрузок ввиду склонности к образованию холодных трещин. Тра-

диционно при сварке закаливающихся сталей используют предварительный подогрев, уменьшающий вероятность образования закалочных структур, либо термическую обработку (отпуск) для конструкций в целом, либо для ее отдельных частей после сварки [1–5].

В работе приведены результаты исследования влияния термической обработки на следующие механические свойства стали 42Х2ГСНМА:  $y_1$  – твердость, HV;  $y_2$  –  $\sigma_T$ , МПа (предел текучести);  $y_3$  –  $\sigma_B$ , МПа (временное сопротивление разрушению);  $y_4$  –  $\delta$ , % (относительное удлинение);  $y_5$  –  $\varphi$ , % (относительное сужение);  $y_6$  – KCV, Дж / см<sup>2</sup> (ударная вязкость);  $x$  – температура отпуска при закалке 900 °С (0, 200, 400, 600 °С).

Без термической обработки сварные соединения, закаливающиеся в процессе остывания на воздухе, особенно от температур, близких к температуре плавления, характеризуются повышенной склонностью к образованию холодных трещин и к хрупкому разрушению. При испытаниях на прочность и ударный изгиб, образцы разрушаются с низкими показателями пластичности и вязкости, а также с большим разбросом значений временного сопротивления и предела текучести (таблица 1).

Таблица 1 – Влияние термической обработки на механические свойства сварных соединений стали 42Х2ГСНМА

Вид термической обработки	HV	Механические свойства				
		$\sigma_T$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %	$\varphi$ , %	KCV, Дж/см <sup>2</sup>
Закалка от 900 °С	570–610	1301–1720	1415–1980	3,5–4,7	14–21	7–15
Закалка от 900 °С, отпуск при 200°С	500–530	1670	1983	7,1	35,7	53
Закалка от 900 °С, отпуск при 400°С	415–450	1280	1409	9,3	39,0	85
Закалка от 900 °С, отпуск при 600°С	280–315	870	1010	13,5	56,0	130

Полученные данные свойств стали 42Х2ГСНМА позволяют предположить, что связь между ними и температурой отпуска можно выразить линейным уравнением регрессии:

$$y_i = a + bx, \quad (1)$$

где  $a$  и  $b$  – коэффициенты уравнения, которые можно найти по методике [6]. Например, если построить график зависимости твердости HV ( $y_i$ ) от температуры отпуска ( $x$ ), то получим линейную зависимость (рисунок 1).

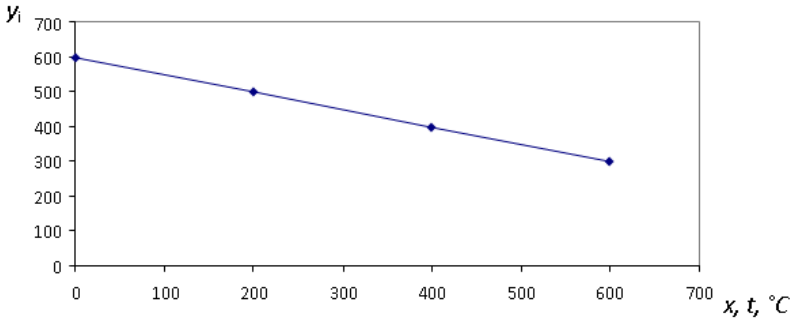


Рисунок 1 – Вид графика линейной зависимости параметра механического свойства  $y_i$  от температуры отпуска  $x$

Для получения уравнения рассчитаем  $a$  и  $b$  [1]. Линейную функцию запишем в виде:

$$y - \bar{y}_1 = ah \frac{x - \bar{x}}{h}, \quad (2)$$

где  $\bar{y}_1$  – среднее значение HV;  $a$  – коэффициент уравнения;  $h$  – интервал аргумента (примем его равным 100 °C);  $\bar{x}$  – среднее значение этого аргумента (в нашем случае 300 °C).

Для достоверности примем  $t = 0, 100, 200, 300, 400, 500, 600$  °C, т.е. семь точек.

При нечетном числе данных  $N = 2M - 1$ . т.е.  $M = \frac{N}{2} = 4$ . Значение  $ah$  можно определить по формуле:

$$ah = \frac{12}{N(N^2 - 1)} \sum_{k=1}^N y_k (k - M), \quad (3)$$

где  $k$  – номер точки.

Для удобства построим таблицу для  $N = 7$  (таблица 2).

Таблица 2 – Данные для расчета параметров многочлена (3)

Номера точек	Значения функции	Расчет по семи точкам		
		$l = k - 4$	$y_+ - y_-$	$l(y_+ - y_-)$
1	600	-3		
2	550	-2		
3	500	-1		
4	460	0		
5	425	+1	-75	-75
6	370	+2	-180	-360
7	310	+3	-290	-870
Сумма	3215	-	-	-1305

Для расчета линейной зависимости по 7-ми точкам имеем:

$$\sum_{k=1}^7 y_k = 3215; \quad \sum_{k=1}^7 y_k(k-4) = -1305; \quad \bar{y} = \frac{3215}{7} = 459,3;$$

$$ah = \frac{12}{7(49-1)}(-1305) = -46,607.$$

Следовательно,  $y - 459,3 = -46,6 \frac{x - \bar{x}}{h}$ , где  $h = 100$ ,  $\bar{x} = 300$ , т.е.

соотношение между твердостью и температурой отпуска выражается следующим уравнением регрессии:

$$y_1 = 599 - 0,466x. \quad (4)$$

В таблице 3 представлены вычисленные значения твердости стали 42Х2ГСНМА и величина квадратов их значений, согласно уравнению (2).

Можно проверить адекватность уравнения (4) при ошибке опыта  $S_1 = 23$ ,  $S_1^2 = 529$ :

$$\sum_1^7 \Delta y_1^2 = 299,16; S_{\text{аа}}^2 = \frac{299,16}{7-2} = 59,832; F = \frac{59,832}{529} < 1, \text{ т.е. уравне-}$$

ние (4) адекватно.

Таблица 3 – Вычисленные значения твердости стали 42Х2ГСНМА и величина квадратов их значений

N	Вид уравнения (4) с подставленными значениями температур 0, 100, 200, 300, 400, 500 и 600 °С	Величина квадратов значений твердости, вычисленных по уравнению (4)
1	$599 - 0,466 \cdot 0 = 599 - 600 = 1$	1
2	$599 - 0,466 \cdot 100 = 552,4 - 550 = 2,4$	5,76
3	$599 - 0,466 \cdot 200 = 505,3 - 500 = 5,3$	28,09
4	$599 - 0,466 \cdot 300 = 459,2 - 460 = 0,8$	0,64
5	$599 - 0,466 \cdot 400 = 412,6 - 425 = 12,4$	153,76
6	$599 - 0,466 \cdot 500 = 366 - 370 = 4$	16
7	$599 - 0,466 \cdot 600 = 319,4 - 310 = 9,4$	88,36

Пользуясь указанным методом, были найдены уравнения регрессии и для других параметров (5)–(9):

$$y_2 = \sigma_{\delta}, \text{ П\ddot{a}} = 1812 - 1,44x. \quad (5)$$

Это уравнение адекватно, что подтверждается близостью расчетных значений и опытных значений предела текучести и величиной коэффициентов парной корреляции:  $r_2 = -0,953$ . Для этого уравнения:  $S_{y_2} = 69$  МПа,  $S_y^2 = 4261$ .

Подставляя в уравнение (5) значения величин температур 0, 200, 400 и 600 °С, получаем следующие значения  $y_2$ : 112, 146, 44 и 78 МПа соответственно. Сумма квадратов вычисленных значений составляет 41820 МПа. Исходя из полученного значения, вычисляем дисперсию адекватности и коэффициент Фишера:

$S_{\text{aa}}^2 = \frac{41820}{4-2} = 20940$ ;  $F_p = \frac{20940}{4761} = 4,4 < 6,9$  при  $\alpha = 0,05$ ,  $f_1 = 2$ ,  $f_2 = 4$ . С увеличением температуры отпуска предел текучести  $\sigma_T$  уменьшается.

Соотношение между временным сопротивлением разрушению и температурой:

$$y_3 = \sigma_{\text{a}} (\text{Н/мм}^2) = 2132,1 - 1,772x. \quad (6)$$

На основании проведенных расчетов, подобных для уравнения (5), получаем:  $S_y = 80$ ,  $S_y^2 = 6400$ ,  $r = -0,953$ , а  $S_{\text{aa}}^2 = \frac{63272,2}{2} = 31636,1$  и  $F_p = \frac{31636,1}{6400} = 4,943 < 6,9$ .

Соотношение между относительным удлинением и температурой отпуска:

$$y_4 = \delta (\%) = 3,94 - 0,0152x, \quad (7)$$

т.е. получаем  $S_y = 0,425$ ;  $S_y^2 = 0,181$ . Для вычисления величин относительного удлинения используем те же значения температур отпуска 0, 200, 400 и 600 °С. Полученное значение квадратов суммы относительного удлинения составляет 0,752 %. Проверим адекватность уравнения:  $S_{\text{aa}}^2 = \frac{0,752}{2} = 0,376$ , а  $F_p = \frac{0,376}{0,181} = 2,072 < F_{2,4} = 6,9$ .

Соотношение между относительным сужением и температурой отпуска:

$$y_5 = \varphi (\%) = 17,48 + 0,06315. \quad (8)$$

По этой же методике для проверки адекватности уравнения сумма квадратов величин относительного сужения составляет 51,783, тогда  $S_y = 1,82$ ;  $S_y^2 = 3,317$ ;  $r = 0,969$ ;  $S_{\text{aa}}^2 = \frac{51,783}{2} = 25,89$ ;

$F_p = \frac{25,89}{3,317} = 7,8 > F_{2,4} = 6,9$  (при  $\alpha = 0,05$ ), но меньше  $F_{2,4} = 18$  (при  $\alpha = 0,01$ ): т.е. с вероятностью 99 % модель (8) адекватна.

Соотношение между ударной вязкостью и температурой:

$$y_6 = KCV (\text{Дж/см}^2) = 10,7 + 0,196x. \quad (9)$$

Для этой модели сумма квадратов величине ударной вязкости по уравнению (9) составляет 29,8;  $S_{\text{аа}}^2 = \frac{29,8}{4-2} = 14,9$ ;  $F_p = \frac{14,9}{12,0756} = 1,23 < F_{2,4} = 6,9$ , следовательно, модель (9) адекватна.

На основании проведенных расчетов установлена линейная зависимость между температурой отпуска, твердостью (HV), пределом текучести ( $\sigma_t$ , МПа), временным сопротивлением разрушению ( $\sigma_b$ , МПа); относительным удлинением ( $\delta$ , %); относительным сужением ( $\varphi$ , %); ударной вязкостью (KCV, Дж/см<sup>2</sup>). Причем в противоположность другим механическим свойствам показатели относительного сужения и ударной вязкости с ростом температуры отпуска увеличиваются.

## Литература

- 1. Курдюмов, Г.В.** Превращения в железе и стали / Г.В. Курдюмов, Л.М. Утевский, Р.И. Энтин. – М.: Наука, 1977. – 238 с.
- 2. Макаров, Э.Л.** Проблемы свариваемости высокопрочных легированных сталей // Прогрессивная технология конструкционных материалов: Тр. МВТУ им. Н. Баумана. – 1980. – № 341. – С. 153–161.
- 3. Напряжения** второго рода в имитированных образцах из высокопрочной стали / Ю.А. Стеренбоген [и др.] // Симпозиум СЭВ по применению математических методов при изучении свариваемости: сб. докл. – Ч. 2. – София: ВМЭИ им. В.И. Ленина, 1983. – С. 72–74.
- 4. Савицкий, М.М.** Сопутствующая термическая обработка соединений закаливающих сталей при аргонно-дуговой сварке / М.М. Савицкий // Автоматическая сварка. – 1998. – № 15 (549). – С. 43–46.