

Литература

1. **Наплавочные материалы стран-членов СЭВ.** – Каталог. Координационный центр по проблеме «Сварка». – Киев–Москва: Международный центр научной и технической информации, 1979. – 619 с.

2. **Стефанович, В.А.** Исследование возможности получения наплавленных покрытий из борированной проволоки / В.А. Стефанович, В.Г. Борисов, А.В. Стефанович // Сборник научных трудов, посвященный 40-летию кафедры «Материаловедение в машиностроении». – Минск, 2004. – С. 56–62.

3. **Искольдский, И.И.** Наплавочные боридные твердые сплавы / И.И. Искольдский. – М.: Машиностроение, 1965. – 71с.

УДК 621.791.052-026.56:669.747: 519.2

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

ВЛИЯНИЕ СОДЕРЖАНИЯ МАРГАНЦА НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛА НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СВАРНЫХ ШВОВ

Механические свойства сварного шва тесно связаны с его химическим составом, кинетикой затвердевания и перекристаллизации и микроструктурой. Результаты последних исследований [1] выявили, что повышенное содержание марганца в металле швов с ферритно-перлитной структурой может привести к увеличению содержания перлитной составляющей, и в некоторых случаях – к охрупчиванию. Для проведения исследований выбрали образцы металлов швов, полученные при сварке под флюсами, которые отличались индексом основности W и содержанием MnO , в сочетании с проволоками Св-08А и Св-08ГА [2]. Сварку стыковых соединений выполняли на режимах и по методике стандарта ISO 14171. Содержание марганца в металле исследуемых швов изменялось от 0,30 до 1,84 масс. % (таблица 1). При этом содержание углерода и кремния

в металле швов 1–8 изменялось в узких пределах (соответственно 0,031–0,062 и 0,130–0,279 масс. %). Металл швов 9–11 содержал повышенную массовую долю кремния (0,421–0,630 %). Оценка стойкости металлов швов против разрушения проводилась с помощью показателя истинного сопротивления разрыву S_k , рассчитанного по формуле в соответствии с ГОСТ 1497:

$$S_k = P_k / F_k, \quad (1)$$

где P_k – нагрузка в момент разрыва образца; F_k – площадь минимального (истинного) поперечного сечения образца после разрушения.

В данной работе использованы методы математического планирования эксперимента, корреляционного, дисперсионного и регрессионного анализов для установления зависимости показателей механических свойств сварного шва и соотношения $MnO/Mn_{т.р}$ ($Mn_{т.р}$ – твердый раствор марганца). В таблице 1 приведены результаты исследования механических свойств образцов с различным содержанием марганца.

Таблица 1 – Механические свойства сварного шва

№ образца	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_b , МПа	δ , %	ψ , %	S_k , МПа	Содержание Mn, %
1	329	408	30	64	1129	0,30
2	326	402	28	59	974	0,37
3	367	466	34	74	1800	0,63
4	315	434	26	64	1198	0,77
5	349	491	36	75	1955	0,85
6	351	455	25	66	1325	0,99
7	344	433	29	60	1074	1,00
8	357	473	32	75	1878	1,13
9	325	508	29	65	1447	1,41
10	418	524	25	59	1263	1,45
11	437	524	23	63	1588	1,84

Между содержанием Mn и механическими свойствами были установлены следующие зависимости, МПа:

$$y_1 = \sigma_{0,2} = 300 \cdot 1,204^x = a \cdot b^x, \quad (2)$$

где x – содержание марганца, %.

Коэффициент корреляции для этой зависимости равен $r_{xy} = 0,838$, что больше табличного ($r_{xy} = 0,7348$) при $\alpha = 0,01, f = n - 2 = 11 - 2 = 9$.

Между σ_u и Mn также существует зависимость в виде, МПа:

$$y_2 = \sigma_u = a \cdot b^x = 377,37 \cdot 1,247^x \quad (r_{xy} = 0,909). \quad (3)$$

Зависимость δ, ψ и S_k от содержания Mn не удалось установить, поэтому было принято решение применить для этой цели обобщенный (комплексный) показатель этих свойств [3] $D = \sqrt[n]{d_1 \cdot d_2 \dots d_n}$, где $d_1; d_2 \dots d_n$ – частные функции желательности механических характеристик.

Частные функции желательности, в свою очередь, определялись по формуле:

$$d_i = \exp[-\exp(-y')] = e^{-e^{-y'}} \quad (4)$$

где y'_i – кодированный уровень i -го свойства.

Для нахождения D сначала строили шкалу желательности (таблица 2).

Для определения y'_i, d_i и D для значений таблицы 1 построили график функции желательности, отложив по оси абсцисс кодированные уровни y' , а по оси ординат – d_i (рисунок 1), пользуясь таблицей 2. Затем, проведя параллельно оси абсцисс 5 прямых, соответствующих исследуемым характеристикам свойств ($\sigma_{0,2}, \sigma_u, \delta, \psi$ и S_k), определили на них значения этих характеристик из шкалы желательности.

в металле швов 1–8 изменялось в узких пределах (соответственно 0,031–0,062 и 0,130–0,279 масс. %). Металл швов 9–11 содержал повышенную массовую долю кремния (0,421–0,630 %). Оценка стойкости металлов швов против разрушения проводилась с помощью показателя истинного сопротивления разрыву S_k , рассчитанного по формуле в соответствии с ГОСТ 1497:

$$S_k = P_k / F_k, \quad (1)$$

где P_k – нагрузка в момент разрыва образца; F_k – площадь минимального (истинного) поперечного сечения образца после разрушения.

В данной работе использованы методы математического планирования эксперимента, корреляционного, дисперсионного и регрессионного анализов для установления зависимости показателей механических свойств сварного шва и соотношения $MnO/Mn_{т.р}$ ($Mn_{т.р}$ – твердый раствор марганца). В таблице 1 приведены результаты исследования механических свойств образцов с различным содержанием марганца.

Таблица 1 – Механические свойства сварного шва

№ образца	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_b , МПа	δ , %	ψ , %	S_k , МПа	Содержание Mn, %
1	329	408	30	64	1129	0,30
2	326	402	28	59	974	0,37
3	367	466	34	74	1800	0,63
4	315	434	26	64	1198	0,77
5	349	491	36	75	1955	0,85
6	351	455	25	66	1325	0,99
7	344	433	29	60	1074	1,00
8	357	473	32	75	1878	1,13
9	325	508	29	65	1447	1,41
10	418	524	25	59	1263	1,45
11	437	524	23	63	1588	1,84

Таблица 2 – Частные функции желательности для механических свойств сварного шва

Частная функция желательности, d_i	Кодированное значение показателя, y'	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %	ψ , %	S_k , МПа
1,00–0,80 (отлично)	4,00	450	600	40	80	1900
0,80–0,63 (хорошо)	1,500	410	550	35	72	1650
0,63–0,37 (удовлетворит.)	0,850	370	500	30	64	1400
0,37–0,20 (плохо)	0,000	330	450	25	56	1150
0,20–0,00 (очень плохо)	-0,500	290	400	20	48	900

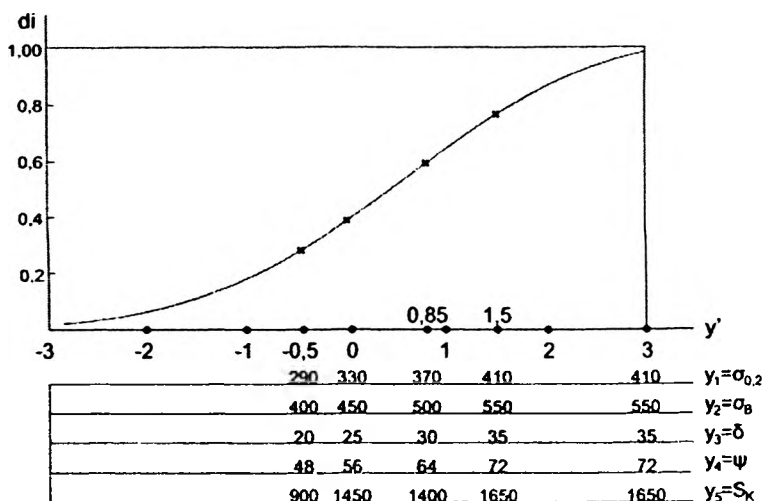


Рисунок 1 – График функции желательности

Пользуясь этим графиком, определили кодированные значения y'_1 и d_i для i -го свойства. Результаты этих расчетов приведены в таблице 3.

Из таблицы 3 видно, что наибольшая величина $D = 0,745$ (хороший результат) получена для образца 5, для которого содержание марганца составляет 0,85 %, $\sigma_{0,2} = 349$ МПа, $\sigma_b = 491$ МПа, $\delta = 36$ %, $\psi = 75$ % и $S_k = 1955$ МПа. Таким образом, этот образец обладает комплексом высоких механических свойств.

У образца 11 наблюдаются самые высокие показатели $\sigma_{0,2}$ и σ_b . Однако низкий показатель δ ($d_3 = 0,263$) привел к тому, что он уступает по комплексному показателю D не только образцу 5, но и образцу 3 ($D = 0,712$), образцу 8 ($D = 0,645$) и образцу 9 ($D = 0,673$).

Между содержанием марганца и обобщенным показателем D установлена функциональная зависимость, которая выражается в виде уравнения:

$$y_6 = D = 0,394 \cdot 1,361^x. \quad (5)$$

Расчет коэффициентов парной корреляции производим по формуле:

$$r_{xy} = \frac{\sum_1^n \Delta x \cdot \Delta y}{\sqrt{\sum_1^n \Delta x^2 \sum_1^n \Delta y^2}}, \quad (6)$$

где $\Delta x = (x_i - \bar{x}_i)$, $\Delta y = (y_j - \bar{y}_j)$ – разности между текущими и средними значениями параметров x и y .

В результате получены следующие данные (см. таблицу 4).

Таблица 3 – Натуральные значения и функции желательности частных характеристик свойств

№ об- разца	$\sigma_{0,2}$, МПа	d'_1	σ_{Bp} , МПа	d_2	δ , %	d_3	ψ , %	d_4	S_k , МПа	d_5	$D =$ $= \sqrt[3]{d_1 \cdot d_2 \cdot d_3 \cdot d_4 \cdot d_5}$
1	329	0,364	408	0,217	30,4	0,663	64,0	0,630	1129	0,352	0,401
2	326	0,347	402	0,200	28	0,549	59,0	0,509	974	0,241	0,342
3	367	0,635	466	0,469	34,2	0,781	74	0,860	1800	0,913	0,712
4	315	0,298	434	0,308	26,3	0,449	64	0,620	1192	0,427	0,405
5	349	0,509	491	0,606	36	0,848	75	0,878	1955	1,000	0,745
6	351	0,529	455	0,396	25,3	0,387	6,6	0,689	1325	0,576	0,503
7	344	0,479	433	0,305	28,5	0,576	60	0,509	1074	0,242	0,401
8	357	0,568	473	0,510	32	0,719	75	0,876	1878	0,945	0,645
9	385	0,717	508	0,680	29,2	0,613	65	0,672	1447	0,685	0,673
10	418	0,848	524	0,731	25	0,37	59	0,509	1263	0,512	0,569
11	437	0,922	589	0,933	22,9	0,263	63	0,619	1588	0,769	0,641

$$b = \frac{\sum_1^n \Delta x \cdot \Delta y}{\sum_1^n \Delta x^2}; \quad (10)$$

$$a = \bar{y} - b\bar{x}, \quad (11)$$

где \bar{x} и \bar{y} – средние значения показателей.

Пользуясь данными таблицы 4, можно определить множественный коэффициент корреляции $r_{1,2,3,4,5,6}$ по формуле:

$$r_{1,2,3,4,5,6} = \sqrt{\beta_2 r_{12} + \beta_3 r_{13} + \beta_4 r_{14} + \beta_5 r_{15} + \beta_6 r_{16}}, \quad (12)$$

где $r_{12}, r_{13}, r_{14}, r_{15}, r_{16}$ – коэффициенты парной корреляции обобщенного показателя D с другими механическими свойствами ($\sigma_{0,2}, \sigma_a, \delta, \psi$ и S_k), а $\beta_2, \beta_3, \beta_3, \beta_4, \beta_5, \beta_6$ – стандартизированные коэффициенты множественной корреляции.

Коэффициенты $\beta_2, \beta_3, \beta_3, \beta_4, \beta_5, \beta_6$ определяли по методу наименьших квадратов из системы линейных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} r_{12} &= \beta_2 + \beta_3 r_{32} + \beta_4 r_{42} + \beta_5 r_{52} + \beta_6 r_{62} \\ r_{13} &= \beta_2 r_{23} + \beta_3 + \beta_4 r_{43} + \beta_5 r_{53} + \beta_6 r_{63} \\ r_{14} &= \beta_2 r_{24} + \beta_3 r_{34} + \beta_4 + \beta_5 r_{54} + \beta_6 r_{64} \\ r_{15} &= \beta_2 r_{25} + \beta_3 r_{35} + \beta_4 r_{45} + \beta_5 + \beta_6 r_{65} \\ r_{16} &= \beta_2 r_{26} + \beta_3 r_{36} + \beta_4 r_{46} + \beta_5 r_{56} + \beta_6 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

В нашем случае эту систему запишем в виде:

$$\left. \begin{aligned} 0,56 &= \beta_2 + \beta_3 \cdot 0,93 + \beta_4 \cdot 0,34 + \beta_5 \cdot (-0,37) + \beta_6 \cdot (-0,1) \\ 0,66 &= \beta_2 \cdot 0,93 + \beta_3 + \beta_4 \cdot 0,51 + \beta_5 \cdot (-0,23) + \beta_6 \cdot 0,1 \\ 0,92 &= \beta_2 \cdot 0,34 + \beta_3 \cdot 0,51 + \beta_4 + \beta_5 \cdot 0,1 + \beta_6 \cdot 0,912 \\ 0,44 &= \beta_2 \cdot (-0,37) + \beta_3 \cdot (-0,23) + \beta_4 \cdot 0,1 + \beta_5 + \beta_6 \cdot 0,755 \\ 0,72 &= \beta_2 \cdot (-0,1) + \beta_3 \cdot 0,1 + \beta_4 \cdot 0,912 + \beta_5 \cdot 0,755 + \beta_6 \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

Решая эту систему линейных уравнений, найдем значения $\beta_2 = 0,14$, $\beta_3 = 0,624$, $\beta_4 = 0,184$, $\beta_5 = 0,046$, $\beta_6 = 0,804$.

Коэффициенты уравнений регрессии в натуральном масштабе запишем:

$$\bar{x}_{1,2,3,4,5,6} = b_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_5x_5 + b_6x_6, \quad (15)$$

где $x_2 = \sigma_{0,2}$, $x_3 = \sigma_n$, $x_4 = S_k$, $x_5 = \delta$ и $x_6 = \psi$ рассчитываем по формулам:

$$\left. \begin{aligned} b_i &= \beta_i \frac{S_1}{S_i}, \quad i = 1, 2, 3, 4, 5, 6 \\ b_1 &= \bar{x}_1 - b_2\bar{x}_2 - b_3\bar{x}_3 - b_4\bar{x}_4 - b_5\bar{x}_5 - b_6\bar{x}_6 \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

Здесь $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3, \bar{x}_4, \bar{x}_5, \bar{x}_6$ – средние значения $D, \sigma_{0,2}, \sigma_n, S_k, \delta$ и ψ .

Для расчета этих коэффициентов составили таблицу 5.

Таблица 5 – Значение выборочных парных коэффициентов корреляции между $D, \sigma_{0,2}, \sigma_n, S_k, \delta$ и ψ

Случайные величины	x_i	Среднее значение x	Средняя квадратическая ошибка, σ_i
Обобщенный показатель, D	x_1	0,550	0,137
Предел текучести, $\sigma_{0,2}$, МПа	x_2	361,7	36,4
Предел прочности, σ_n , МПа	x_3	471,2	52,5
Сопротивление разрыву, S_k , МПа	x_4	1421,5	324
Относительное удлинение, δ , %	x_5	28,9	3,84
Относительное сужение, ψ , %	x_6	65,65	5,83

Пользуясь формулой (16), получили следующие значения коэффициентов:

$$b_2 = \beta_2 \frac{\sigma_1}{\sigma_2} = 0,14 \frac{0,137}{36,4} = 5,269 \cdot 10^{-4};$$

$$b_3 = 0,624 \frac{0,137}{52,5} = 1,628 \cdot 10^{-3};$$

$$b_4 = -0,184 \frac{0,137}{324} = -7,78 \cdot 10^{-5}; \quad b_5 = 0,046 \frac{0,137}{3,84} = 1,641 \cdot 10^{-3};$$

$$b_6 = 0,804 \frac{0,137}{5,93} = 0,0186;$$

$$b_1 = 0,55 - 5,269 \cdot 10^{-4} \cdot 361,7 - 0,00163 \cdot 471,2 + 7,78 \cdot 10^{-5} \cdot 1421,5 - \\ - 1,641 \cdot 10^{-3} \cdot 28,9 - 0,0186 \cdot 65,65 = -1,567.$$

Таким образом, обобщенный показатель D связан с остальными механическими свойствами уравнением:

$$D = 5,269 \cdot 10^{-4} \cdot \sigma_{0,2} + 1,628 \cdot 10^{-3} \sigma_B - 7,78 \cdot 10^{-5} S_k + \\ + 1,641 \cdot 10^{-3} \delta + 0,0186 \psi - 1,567. \quad (17)$$

Множественный коэффициент корреляции в нашем случае в соответствии с формулой (12) запишем:

$$r_{1,2,3,4,5,6} = \\ = \sqrt{0,14 \cdot 0,56 + 0,624 \cdot 0,66 - 0,184 \cdot 0,92 + 0,046 \cdot 0,44 + 0,72 \cdot 0,804} = \\ = \sqrt{0,92008} = 0,956 \approx 0,96,$$

что указывает на тесную связь D с исследуемыми механическими свойствами сварного шва.

Средняя квадратическая ошибка определений обобщенного показателя D на основании полученного уравнения регрессии (17) определялась по формуле:

$$S_D = \sigma_D \sqrt{(1) \frac{n-1}{n-2}} = 0,137 \cdot \sqrt{(1-0,96^2) \left(\frac{n-1}{n-2}\right)} = 0,0404. \quad (18)$$

Квадрат коэффициента множественной корреляции ($r_{1,2..m}^2$) носит название коэффициента детерминации α . Он измеряет ту долю вариации y (D), которая определена влиянием $x_1, x_2 \dots x_m$.

Использование коэффициента детерминации весьма целесообразно в технологическом анализе. Он более удобен, ибо прямо отражает долю тех изменений выходной величины (D), которые зависят от контролируемых входных величин других характеристик.

Ввиду того, что между содержанием марганца и показателем истинного сопротивления разрыву S_k установить зависимость трудно, то можно для описания влияния легирования металла швов марганцем на его структуру и механические свойства использовать соотношение $MnO/Mn_{т.р}$ (таблица 6).

Таблица 6 – Истинные сопротивления разрыву S_k и содержание полигонального феррита (ПФ) при различных соотношениях $MnO/Mn_{т.р}$

$MnO/Mn_{т.р}$	30	60	90	120	130
S_k , МПа	1970	1591	1176	1072	1063
ПФ, об.%	22	42	92	89	75

Зависимость между S_k и $MnO/Mn_{т.р}$ может быть представлена в виде:

$$y_1 = S_k = 2223 \cdot 0,934^x, \quad (19)$$

где x – соотношение $MnO/Mn_{т.р}$.

Зависимость между ПФ (y_2) и $MnO/Mn_{т.р}$ (x) можно выразить так:

$$y_2 = \text{ПФ, \%} = 42,01 \ln x - 119,126. \quad (20)$$

Наконец, зависимость между обобщенным показателем и указанным соотношением (приведено в таблице 7) можно представить в виде:

$$y_3 = D = 0,83 \cdot 0,995^x . \quad (21)$$

Таблица 7 – Зависимость между обобщенным показателем и соотношением $MnO/Mn_{\Gamma P}$

$MnO/Mn_{\Gamma P}$	167,7	155,3	51,9	99	30,6	72	136,2	44,8	66,2	50,1	55,6
D	0,41	0,342	0,712	0,409	0,745	0,503	0,401	0,645	0,673	0,569	0,641

Таким образом, полученные результаты позволяют использовать соотношение $MnO/Mn_{\Gamma P}$ для оценки влияния содержания марганца в металле сварных швов на его структуру и механические свойства.

Литература

1. Анализ структурного состава металла швов, выполненных сварочными проволоками феррито-перлитного класса / В.Ф. Грабин [и др.] // Автомат. сварка. – 2003. – № 8. – С. 18–20.
2. Влияние распределения марганца между структурными составляющими на свойства металла низколегированных швов / Грабин В.Ф. [и др.] // Автомат. сварка. – 2007. – № 12. – С. 26–29.
3. Вознесенский, В.А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях / В.А. Вознесенский. – М.: Финансы и статистика, 1981. – 264 с.

УДК 621.79.01:621.793.1 + 621.785.5

В.М. КОНСТАНТИНОВ, д-р техн. наук,
Г.А. ТКАЧЕНКО, канд. техн. наук,
А.В. КОВАЛЬЧУК (БНТУ)

ПОВЫШЕНИЕ ЖЕСТКОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ОСНОВЫ СИСТЕМ «КОНСТРУКЦИОННАЯ СТАЛЬ – НИТРИД ТИТАНА»

Введение. Разработка нанокompозитных покрытий с характерным размером зерна менее 100 нм для повышения надежности эксплуатации высокоответственных механизмов и одновременная ми-