

тора раза превышает стойкость поддонов из используемой заводом стали 35X18H24C2Л.

Таким образом, при переходе на разработанный состав стали сокращается потребность в никеле, уменьшается объем выплавки стали для поддонов, т.к. увеличивается их эксплуатационная стойкость, снижается объем выбросов в атмосферу. Суммарная экономия на одну тонну литых поддонов составляет 5,4 млн. руб.

УДК 621.771:539:519.22/25

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

ВЛИЯНИЕ СТЕПЕНИ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ПРОКАТКЕ В ЗАКАЛЕННОМ СОСТОЯНИИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТАЛЕЙ

Пластическая деформация служит эффективным средством воздействия на структуру и механические свойства закаленных сталей при надлежащем выборе всех компонентов технологического процесса (марки стали, режима термической обработки, степени деформации) и может обеспечить дополнительное упрочнение материала при сохранении достаточного запаса пластичности и вязкости.

К настоящему времени опубликован ряд работ, в которых отмечено, что при малых степенях пластической деформации после закалки структура и свойства стали претерпевают значительные изменения [1, 2]. В связи с этим представляет интерес исследовать процесс упрочнения закаленных сталей после пластической деформации с большими ($\epsilon > 10\%$) степенями деформации.

В данной работе для исследования были выбраны низкоуглеродистые стали 10ХСНД (0,09% С) и 18Х2Н4ВА (0,17% С). После закалки они подвергались деформированию прокаткой до 50%. Закалку стали 10ХСНД проводили от 900 °С, а стали 18Х2Н4ВА от 850 °С в воде. Перед деформацией образцы зачищали с двух проти-

воположных сторон от окарины в соленой воде. После деформации проводили старение при 200 °С в течение 2 ч.

Для проведения эксперимента по оценке влияния марки стали (x_1) и степени деформации $\epsilon\%$ (x_2) был выбран план 2×3 , где 2 – два уровня марки стали (10ХСНД и 18Х2Н4ВА), 3 – три уровня степени деформации (0; 12,5; 25 %). В качестве параметров оптимизации (функций откликов) были выбраны: y_1 – предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа; y_2 – предел прочности σ_B , МПа; y_3 – относительное удлинение δ , % и y_4 – относительное сужение ψ , %. В качестве управляемых факторов были выбраны: x_1 – марка стали; x_2 – степень деформации $\epsilon, \%$. Ошибки воспроизводимости опытов определялись по результатам 5-ти параллельных опытов при $x_1 = -1$ (сталь 10ХСНД) и $x_2 = 0$ ($\epsilon = 12,5\%$). Они соответственно составили: $S_1 = 61$ МПа, $S_2 = 61$ МПа, $S_3 = 0,6\%$ и $S_4 = 0,97\%$. Во избежание влияния систематических ошибок опыты проводились в случайном порядке.

Матрица плана 2×3 и результаты опытов приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Матрица плана 2×3

N	x_1	x_2	$x_1 x_2$	x_2^2	$y_1 = \sigma_{0,2}$	$y_2 = \sigma_B$	$y_3 = \delta$	$y_4 = \psi$
1	-	-	+	+	520	720	20	66
2	-	0	0	0	850	965	12	60
3	-	+	-	+	1050	1100	9	51
4	+	-	-	+	1300	1460	13	61
5	+	0	0	0	1770	1825	9	58
6	+	+	+	+	1830	1910	8	55

* x_1 и x_2 – кодированные уровни факторов ($x_1 = -1$, сталь 10ХСНД; $x_1 = +1$, сталь 18Х2Н4ВА; $x_2 = -1$, $\epsilon = 0\%$; $x_2 = 0$, $\epsilon = 12,5\%$; $x_2 = +1$, $\epsilon = 25\%$). Для удобства ± 1 опущены.

Статистическую обработку результатов эксперимента производили по методике, приведенной в работе [3]. После проверки зна-

чимости коэффициентов уравнения регрессии получили адекватные модели в виде полиномов второго порядка:

$$y_1 = \sigma_{0,2}, \text{ МПа} = 1310 + 413x_1 + 265x_2 - 135x_2^2; \quad (1)$$

$$y_2 = \sigma_B, \text{ МПа} = 1395 + 402x_1 + 208x_2 - 98x_2^2; \quad (2)$$

$$y_3 = \delta, \% = 10,5 - 1,8x_1 - 4x_2 + 1,5x_1x_2 + 2x_2^2; \quad (3)$$

$$y_4 = \psi, \% = 59 - 5,3x_2 + 2,3x_1x_2. \quad (4)$$

Из уравнений (1) и (2) видно, что наибольшее влияние на пределы текучести ($\sigma_{0,2}$) и прочности (σ_B) оказывает марка стали (x_1), степень деформации (x_2) оказывает несколько меньшее влияние.

Максимальные значения $\sigma_{0,2} = 1830$ МПа и $\sigma_B = 1910$ МПа получены при $x_1 = +1$ (сталь 18Х2Н4ВА) и $x_2 = +1$ ($\epsilon = 25\%$).

Анализ уравнений (3) и (4) показывает, что в этом случае наибольшее влияние на относительное удлинение (δ) и сужение (ψ) оказывает степень деформации ϵ (x_2), а влияние марки стали значительно меньше. С ростом степени деформации ϵ оба параметра оптимизации $y_3 = \delta, \%$ и $y_4 = \psi, \%$ уменьшаются, однако запас пластичности при $x_1 = +1$ и $x_2 = +1$ остается достаточно большим ($y_3 = \delta = 8,2\%$, $y_4 = \psi = 55\%$).

Хорошее сочетание прочности и пластичности, особенно у стали 18Х2Н4ВА ($x_1 = +1$), позволяет существенно повысить значения показателей прочности путем деформации в закаленном состоянии до уровня показателей прочности сталей с более значительным содержанием углерода, например, стали 30ХГСНА, имеющей после обычной закалки $\sigma_\epsilon = 1860$ МПа и $\sigma_{0,2} = 1750$ МПа. При этом пластические свойства низкоуглеродистой стали, деформированной в

мартенситном состоянии, не ниже ($\delta = 8\%$, $\psi = 55\%$), чем у обычно закаленной стали 30ХГСНА ($\delta = 9\%$, $\psi = 46\%$).

Пользуясь данными таблицы 1, запишем

$$r_{i,j} = \frac{\sum_1^N (y_i - \bar{y}_i)(y_j - \bar{y}_j)}{\sqrt{\sum_1^N (y_i - \bar{y}_i)^2 \cdot \sum_1^N (y_j - \bar{y}_j)^2}}, \quad (5)$$

где y_i и \bar{y}_i – текущее и среднее значения i -го параметра, y_j и \bar{y}_j – то же для j -го параметра.

По этой формуле рассчитываем коэффициенты парной корреляции $r_{1,2}$, $r_{1,3}$, $r_{1,4}$, $r_{2,3}$, $r_{2,4}$ и $r_{3,4}$. Они соответственно оказались равными: $r_{1,2} = 0,995$; $r_{1,3} = -0,79$; $r_{1,4} = -0,50$; $r_{2,3} = -0,735$; $r_{2,4} = -0,43$ и $r_{3,4} = 0,875$.

Табличное значение коэффициента парной корреляции $r_{кр} = 0,729$ (при $\alpha = 0,1$ и $f_1 = 4$), т. е. $r_{1,4} = -0,50$ и $r_{2,4} = 0,43$ меньше табличного значения, т.е. между ними нет линейной корреляции. Расчетные значения $r_{i,j}$ приведены в таблице 2, где символом * отмечены коэффициенты парной корреляции более $r_{кр}$.

Таблица 2 – Значения коэффициентов парной корреляции между $\sigma_{0,2}$, σ_B , δ и ψ

Характеристики Параметры оптимизации	$\sigma_{0,2}$	σ_B	δ	ψ
$y_1 = \sigma_{0,2}$		0,995 *	-0,79 *	-0,50
$y_2 = \sigma_B$	0,995 *		-0,735 *	-0,43
$y_3 = \delta$	0,79 *	-0,735 *		0,875 *
$y_4 = \psi$	-0,50	-0,43	0,875 *	

Из приведенной таблицы видно, что относительное удлинение δ связано с остальными параметрами ($\sigma_{0,2}$, σ_B , ψ) линейной корреляционной связью, которую можно выразить в виде следующих уравнений:

$$y_3 = \delta, \% = 20,1 - 0,007 y_1 (\sigma_{0,2}), \quad (6)$$

$$y_3 = \delta, \% = 21,11 - 0,007 y_2 (\sigma_B), \quad (7)$$

$$y_4 = \psi, \% = 46,5 + 1,02 y_3 (\delta). \quad (8)$$

Связь между пределом прочности (σ_B) и пределом текучести ($\sigma_{0,2}$) можно выразить в виде корреляционного уравнения

$$y_2 = \omega_B = 200,5 + 0,926 y_1 (\sigma_{0,2}). \quad (9)$$

Пользуясь этими уравнениями, можно по значениям $y_3 = \delta$, найти (с вероятностью 90%) остальные параметры оптимизации.

При определении компромиссного решения можно воспользоваться поиском комплексного (обобщенного) параметра оптимизации D , определяемого по формуле [4]

$$D = \sqrt[n]{d_1 \cdot d_2 \dots d_n}, \quad (10)$$

где d_i – частные функции желательности i – го параметра оптимизации, определяемые по выражению $d_i = \exp[-\exp(-y'_i)]$ (y'_i – кодированный уровень i – го параметра оптимизации).

Для расчета y'_i , d_i и D найдем вначале частные функций желательности для $\sigma_{0,2}$, σ_B , δ и ψ (табл. 3).

Таблица 3 – Частные функции желательности

d_i	y'_i	$y_1 = \sigma_{0,2}$, МПа	$y_2 = \sigma_B$, МПа	$y_3 = \delta$, %	$y_4 = \psi$, %
1,00–0,80 (отлично)	3,000	1800	1900	20	65
0,80–0,63 (хорошо)	1,500	1500	1600	17	61
0,63–0,37 (удовлетвори- тельно)	0,850	1200	1300	14	57
0,37–0,20 (плохо)	0,000	900	1000	11	53
0,20–0,00 (очень плохо)	-0,500	600	700	8	49

Для определения y'_i и d_i для конкретных значений параметров оптимизации, приведенных в таблице 1, построим график функции желательности в координатах $y'_i - d_i$ и проведем четыре параллельных оси $0 - y'_i$ прямые, на которые нанесем, пользуясь таблицей 3, численные уровни этих параметров ($y_1 = \sigma_{0,2}$; $y_2 = \sigma_B$; $y_3 = \delta$ и $y_4 = \psi$).

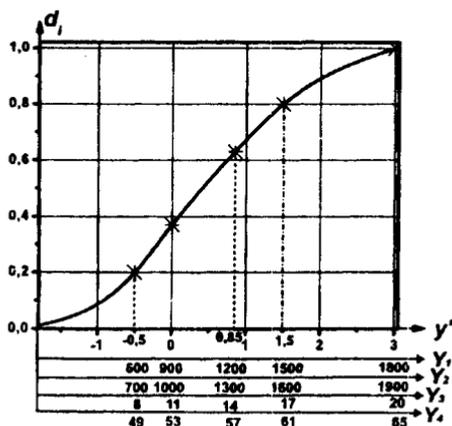


Рисунок 1 – График функции желательности

Таблица 4 – Значения y'_i , d_i и D

N	y'_1	d_1	y'_2	d_2	y'_3	d_3	y'_4	d_4	D
1	-0,633	0,152	-0,467	0,203	3,000	1,000	3,000	1,000	0,419
2	0,083	0,337	-0,058	0,346	0,283	0,471	1,338	0,769	0,453
3	0,425	0,520	0,283	0,471	-0,333	0,248	-0,250	0,277	0,360
4	1,067	0,709	1,197	0,739	0,567	0,567	1,500	0,800	0,698
5	2,850	0,944	2,625	0,930	-0,333	0,248	1,013	0,095	0,624
6	3,000	1,000	3,000	1,000	-0,500	0,200	0,425	0,520	0,568

Пользуясь графиком функции желательности, рассчитаем значения $y'_1, d_1, y'_2, d_2, y'_3, d_3, y'_4, d_4$ (табл. 4), затем по формуле (10) рассчитаем значения D .

Из таблицы 4 видно, что максимальное значение $D = 0,698$ (в хорошей области) получено в условиях опыта $N 4$; $y_1 = \sigma_{0,2} = 1300$ МПа, $y_2 = \sigma_B = 1460$ МПа, $y_3 = \delta = 13\%$, $y_4 = \psi = 61\%$ (закаленная сталь 18Х2Н4ВА ($x_1 = +1$)). Деформируя сталь при $\varepsilon = 0$ ($x_2 = -1$), получим оптимальное соотношение прочностных и пластических свойств для изделий из этой стали.

Таким образом, пластическая деформация низкоуглеродистых закаленных сталей со степенью деформации $\varepsilon = 25\%$ позволяет существенно (в 1,4 – 1,9 раза) повысить их прочностные свойства ($\sigma_{0,2}$ и σ_B), сохраняя при этом приемлемый уровень пластичности ($\delta = 8 - 10\%$, $\psi = 51 - 57\%$).

Литература

1. Процессы деформационного старения мартенсита / Л. М. Клейнер [и др.] // Повышение прочности конструкционной стали и сплавов. – М.: МДНТП, 1966. – С. 70–81.
2. Стародубов, К. Ф. Упрочнение стали при деформационном старении мартенсита / К. Ф. Стародубов, А. Н. Касимов // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1974. – № 1. – С. 58–60.
3. Вознесенский, В. А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях / В. А. Вознесенский. – М.: Статистика, 1974. – 192 с.
4. 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.