

4. Прогрессивные методы ХТО / Под ред. Г. Н. Дубинина, Я. Д. Когана. – М., 1979. – 184 с.

5. Термоциклическая обработка сталей, сплавов и композиционных материалов / Под ред. М. Х. Шорошова. – М., 1984. – 187 с.

6. Семенченко М. В., Губанов А. С. Электротермоциклический отжиг диффузионно-легированной проволоки для защитных покрытий // Материалы, технологии и оборудование для упрочнения и восстановления деталей машин: Тем. сб. – Минск: УП «Технопринт», 2003. – С. 131–133.

7. Патент на полезную модель РБ № 696. Установка для термической обработки проволоки / В. М. Константинов, А. С. Губанов, С. Н. Абраменко, М. В. Семенченко.

УДК 669.14-156:621.785.5

Е. С. ГОЛУБЦОВА, канд. техн. наук,

Б. А. КАЛЕДИН, канд. техн. наук (БНТУ), **Н. Б. КАЛЕДИНА** (БГТУ)

ПОВЫШЕНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАКАЛЕННЫХ СТАЛЕЙ ПУТЕМ ДЕФОРМАЦИОННОГО УПРОЧНЕНИЯ

Современное машиностроение неразрывно связано с использованием материалов. Из года в год увеличиваются и потребность в различного рода материалах, и необходимость их беречь и экономить. Главные пути сокращения расхода материалов хорошо известны – это улучшение технологии производства, совершенствование конструкций машин и оборудования, снижение их массы. Поднять эффективность использования, например, металлических материалов можно за счет повышения их качества, разработки и внедрения в производство новейших методов упрочнения.

Существенным резервом экономии металлов является широкое применение в машиностроении высокопрочных конструкционных сталей, позволяющих снизить материалоемкость производства благодаря увеличению надежности и рациональному понижению запаса прочности деталей машин, аппаратов и конструкций [1].

Опыт последних лет показывает, что проблема обеспечения новой техники высокопрочными сталями не может быть решена с помощью одних лишь традиционных способов воздействия на структуру и свойства металла (легирование, термическая обработка). За-

дача усложняется повышением требований к подобным материалам, поскольку в сложных условиях работы современных конструкций они испытывают действие разнообразных факторов: высокого давления, низкой и высокой температуры, химической активности окружающей среды, сложного напряженного состояния и др.

В связи с этим очевидна необходимость разработки методов комплексного улучшения свойств сталей для повышения их конструктивной прочности и работоспособности. Проводимые в этом направлении исследования показывают перспективность методов, базирующихся на реализации потенциальных возможностей металлов, определяемых их структурой в широком ее понимании.

К числу наиболее результативных способов воздействия на различные структурные элементы (от макроскопических до субмикроскопических) относится термомеханическая обработка (ТМО). Комбинирование в разной последовательности пластической деформации с закалкой позволяет повышать прочностные характеристики стали при сохранении, а в некоторых случаях даже при увеличении ее пластичности и вязкости. Такое улучшение свойств является гарантией повышения конструктивной прочности сталей и их долговечности.

В данной работе исследуются технологичные схемы комбинированной обработки, основанные на пластической деформации сталей различных классов после закалки. Увеличение плотности дефектов в кристаллической решетке стали под действием такой обработки способствует ускорению диффузии, что интенсифицирует процессы старения при последующем нагреве.

Для исследования эффективности пластической деформации после закалки были выбраны низкоуглеродистые стали 10ХСНД (0,9% С) и 18Х2Н4ВА (0,17% С). Образцы из этих сталей деформировали прокаткой со степенью обжатия до 25%. Закалку поковок из стали 10ХСНД, которые имели квадратное сечение со стороной 20 мм, проводили от 900 °С. Перед деформацией их зачищали с двух противоположных сторон от окалины в соленой воде. После деформации проводили старение при 200 °С в течение 2 ч. Образцы стали 18Х2Н4ВА закаливали при температуре от 850 °С в воде и после деформации подвергали старению при температуре 200 °С в течение 2 ч.

Пределы текучести $\sigma_{0,2}$ и прочности σ_B , а также относительное удлинение δ и сужение ψ определяли из диаграмм растяжения по стандартной методике.

Для проведения эксперимента был выбран план 2×3 , где 2 – два уровня сталей ($x_1 = -1$, сталь 10ХСНД; $x_1 = +1$, сталь 18Х2Н4ВА), а 3 – три уровня степени деформации (0; 12,5 и 25%). В качестве параметра оптимизации были выбраны показатели механических свойств этих сталей: $y_1 = \sigma_{0,2}$, МПа, $y_2 = \sigma_B$, МПа, $y_3 = \delta$, %, и $y_4 = \psi$, %.

Опыты проводились в случайном порядке во избежание влияния систематических ошибок. Ошибки воспроизводимости опытов брались из ранее проведенных испытаний шести образцов при $\epsilon = 25\%$. Они соответственно равны $S_1 = 25$ МПа, $S_2 = 20$ МПа, $S_3 = 0,6\%$ и $S_4 = 0,97\%$.

Матрица плана 2×3 и результаты эксперимента приведены в табл. 1. Обработку результатов эксперимента проводили по методике работы [2].

Таблица 1. Матрица плана и результаты эксперимента

N	x_1	x_2	$x_1 x_2$	x_1^2	$y_1 = \sigma_{0,2}$	$y_2 = \sigma_B$	$y_3 = \delta$	$y_4 = \psi$
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

Примечание. 1 N – число опытов (строк в матрице), x_1 и x_2 – кодированные уровни факторов (сталь и степень деформации).

Кодирование уровней степени деформации ($x_2 = \epsilon, \%$) проводили по формуле

$$x_i = \frac{\tilde{x}_i - 0,5(\tilde{x}_{i\max} + \tilde{x}_{i\min})}{0,5(\tilde{x}_{i\max} - \tilde{x}_{i\min})}, \quad (1)$$

где x_i – кодированный уровень; \tilde{x}_i , $\tilde{x}_{i\max}$ и $\tilde{x}_{i\min}$ – натуральные значения текущего, максимального и минимального уровней i -го фактора (в данном случае x_2).

Первый фактор (x_1) кодировался так: $x_1 = -1$, сталь 10ХСНД, $x_1 = +1$, сталь 18Х2Н4ВА.

После статистической обработки результатов эксперимента и проверки значимости коэффициентов уравнения были получены адекватные модели (расчетные критерии Фишера F оказались меньше табличного значения $F_{кр}$ при уровне доверия $\alpha = 0,05$ и степени свободы $f_1 = 2$ и $f_2 = 6$):

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

$$y_2 = \sigma_b, \text{ МПа} = 1395 + 405x_1 + 208x_2 - 98x_2^2, \quad (3)$$

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

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

Из уравнений (2) и (3) видно, что на пределы текучести и прочности большее влияние оказывает марка стали (x_1) (вернее содержание в ней углерода), хотя и влияние степени деформации (x_2) тоже велико. Максимальные величины $\sigma_{0,2} = 1830$ МПа и $\sigma_b = 1910$ МПа получены, когда оба фактора были на верхнем уровне ($x_1 = -1$ и $x_2 = +1$), т. е. для стали 18Х2Н4ВА и степени деформации 25%.

Таким образом, обе эти характеристики в результате пластической деформации после закалки увеличились соответственно в 1,5–2 раза у стали 10ХСНД ($x_1 = -1$) и в 1,4 раза у стали 18Х2Н4ВА при вполне допустимом снижении пластичности.

Следовательно, значения показателей прочности стали 18Х2Н4ВА путем деформации в закаленном состоянии можно поднять до уровня показателей прочности стали с более значительным содержанием углерода, например стали 30ХГСА, имеющей после обычной закалки $\sigma_b = 1860$ МПа и $\sigma_{0,2} = 1750$ МПа. При этом пластические свойства низкоуглеродистой стали, деформированной в мартенситном состоянии, даже несколько лучше ($\delta = 9\%$, $\psi = 56\%$), чем стали 30ХГСА ($\delta = 10\%$, $\psi = 46\%$).

Анализ уравнений (4) и (5) показывает, что на пластичность обеих сталей большое влияние оказывает степень деформации (x_2): с ее увеличением δ и ψ уменьшаются. Минимальные значения этих ха-

рактических будут у стали 10ХСНД ($x_1 = -1$) при степени деформации 25% ($x_2 = +1$), $\delta = 9\%$ и $\psi = 51\%$; у стали 18Х2Н4ВА ($x_1 = +1$) (при той же степени деформации) $\delta = 8$ и $\psi = 55\%$.

Рост упрочнения с увеличением степени деформации после закалки вызван повышением плотности дислокаций, их взаимодействием с атомами углерода и распадом тетрагонального мартенсита [3]. Определенный вклад в упрочнение при деформации дает превращение остаточного аустенита в мартенсит.

Дополнительный статистический анализ табл. 1 показывает, что между исследуемыми параметрами оптимизации существует определенная корреляционная связь, поскольку расчет коэффициентов парной корреляции по формуле

$$r_{i,j} = \frac{\sum_1^N (y_i - \bar{y}_i)(y_j - \bar{y}_j)}{\sqrt{\sum_1^N (y_i - \bar{y}_i)^2 \sum_1^N (y_j - \bar{y}_j)^2}}, \quad (6)$$

где y_i, y_j, \bar{y}_i и \bar{y}_j — текущие и средние значения i -го и j -го параметров оптимизации, показали, что они соответственно равны $r_{1,2} = 0,995 \approx 1,0$; $r_{1,3} = -0,79$; $r_{1,4} = -0,50$; $r_{2,3} = -0,735$; $r_{2,4} = -0,43$ и $r_{3,4} = 0,875$.

Коэффициенты $r_{1,2}, r_{1,3}, r_{2,3}, r_{3,4}$ больше табличных значений $r_{кр} = 0,729$ (при $\alpha = 0,1$ и $f = 6 - 2 = 4$). Следовательно, зависимость между пределом текучести (y_1), пределом прочности (y_2), относительным удлинением (y_3) и сужением (y_4) можно, пользуясь методикой работы [4], выразить следующими корреляционными уравнениями:

$$y_1 = \sigma_b = 200 + 0,93y_1(\sigma_{0,2}), \quad (7)$$

$$y_2 = \delta = 20,1 - 0,007y_1, \quad (8)$$

$$y_3 = \delta = 21,1 - 0,007y_2(\sigma_b), \quad (9)$$

$$y_4 = \psi = 46,5 + 1,02y_3(\delta). \quad (10)$$

Зная величину одного из параметров (например, δ), можно рассчитать остальные параметры без их измерения. Рассчитанные коэффициенты парной корреляции приведены в табл. 2, где звездочкой обозначены коэффициенты $r_{ij} > r_{кр}$.

Таблица 2. Коэффициенты парной корреляции

Параметр	$\sigma_{0,2}$	σ_s	δ	ψ
$y_1 = \sigma_{0,2}$		0,995*	-0,79*	-0,50
$y_2 = \sigma_s$	0,995*		-0,735*	-0,43
$y_3 = \delta$	0,79*	-0,735*		0,875*
$y_4 = \psi$	-0,50	-0,43	0,875*	

Таким образом, деформационное упрочнение сталей 10ХСНД и 18Х2Н4ВА после закалки позволяет значительно увеличить их прочностные характеристики при сохранении достаточных пластических свойств ($\delta = 8-9\%$, $\psi = 51-55\%$).

Рост упрочнения с увеличением степени деформации ($>5\%$) объясняется интенсификацией выделения дисперсной карбидной фазы при последеформационном отпуске при $200\text{ }^\circ\text{C}$ и наклепом металлической основы закаленной стали.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бернштейн М. Л., Смоляков К. Г. Влияние высокотемпературной термомеханической обработки и деформации мартенсита на механические свойства углеродистых и кремнистых сталей // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1972. – № 1. – С. 136–140.
2. Вознесенский В. А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях. – М.: Статистика, 1974. – 192 с.
3. Васильева А. Г. Деформационное упрочнение закаленных конструкционных сталей. – М.: Машиностроение, 1981. – 232 с.
4. Жарский И. М., Каледин Б. А., Кузьмицкий И. Ф. Планирование и организация эксперимента: Учеб. пособие. – Минск: Изд-во БНТУ, 2003. – 179 с.

УДК 621.789

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

ЭФФЕКТИВНОСТЬ УПРОЧНЕНИЯ УГЛЕРОДИСТЫХ И ЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

Исследованию усталостной прочности посвящены многие работы как у нас в стране, так и за рубежом [1–3]. Не рассматривая мно-