

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-

гих теорий и гипотез, посвященных усталостному разрушению, остановимся лишь на некоторых важных положениях, которые получили признание у многих исследователей.

И. А. Одинг [3] впервые обратил внимание на то, что в результате циклически меняющихся нагрузок в материале возникают явления упрочнения и разупрочнения, что можно объяснить ростом числа дислокаций в теле и их движением. При этом упрочнение можно рассматривать как первую подготовительную фазу процесса усталостного разрушения. Разупрочнение связывают с дроблением кристаллитов на блоки, разрыхлением материала, появлением и разветвлением субмикроскопических и магистральных трещин. Очаги трещин образуются в тех зонах, которые подвержены наибольшему по величине растягивающим напряжениям и микроструктура которых обладает меньшим сопротивлением разрушению. В большинстве случаев поверхностный слой деталей подвергается наибольшему нагружению, что чаще всего приводит к образованию в этом слое очагов разрушения. Однако в случае структурной неоднородности металла и при наличии дефектов трещины могут также возникать и на некотором расстоянии от поверхности (внутри поверхностного слоя).

Поскольку большинство упрочняющих обработок относится к таким способам поверхностного упрочнения, которые существенно повышают долговечность деталей, рассмотрим эффективность некоторых способов этого упрочнения.

Для этого по схеме «изгиб с вращением» упрочненные различными способами образцы из стали 40Х диаметром 8–30 мм с кольцевыми концентраторами напряжений испытывали до разрушения, определяя таким образом предел выносливости σ_r . По этой же схеме испытывали образцы диаметром 8–30 мм без концентраторов напряжений.

Перед испытаниями образцы подвергались трем видам обработки: закалка токами высокой частоты (ТВЧ); азотирование при глубине слоя 0,2–0,4 мм, твердость слоя HRC 73–97; цементация при толщине слоя 0,2–0,6 мм. Эффективность упрочнения оценивалась коэффициентом $\beta = \sigma_{r_{уп}} / \sigma_r$, где $\sigma_{r_{уп}}$ – предел выносливости упрочненных образцов; σ_r – предел выносливости неупрочненных образцов.

Для проведения эксперимента был выбран план $2 \times 3 \times 3$, где 2 – два типа образцов: без концентрации напряжений ($\alpha_1 = -1$) и с кон-

центрацией напряжений ($x_1 = +1$)), а 3 – три диаметра образца (8, 19 и 30 мм) и три вида обработки (ТВЧ, азотирование, цементация). Ошибка воспроизводимости опытов определялась по результатам испытаний пяти азотированных образцов с концентраторами напряжений. Она оказалась равной $S = 0,084$.

Матрица плана и результаты эксперимента приведены в табл. 1. Опыты проводились в случайном порядке.

Таблица 1. Матрица плана 2×3×3

N	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	x_1^2	x_2^2	x_3^2	$y_i = \beta$
1	-	-	-	+	+	+	+	+	+	1,50
2	-	-	0	+	0	0	+	0	0	1,70
3	-	-	+	+	-	-	+	+	+	2,00
4	-	0	-	0	+	0	0	0	+	1,25
5	-	0	0	0	0	0	0	0	0	1,10
6	-	0	+	0	-	0	0	0	+	1,11
7	-	+	-	-	+	-	+	+	+	1,30
8	-	+	0	-	0	0	+	0	0	1,20
9	-	+	+	-	-	+	+	+	+	1,25
10	+	-	-	-	-	-	+	+	+	2,50
11	+	-	0	-	0	0	+	0	0	2,55
12	+	-	+	-	+	+	+	+	+	2,50
13	+	0	-	0	-	0	0	0	+	1,80
14	+	0	0	0	0	0	0	0	0	1,60
15	+	0	+	0	+	0	0	0	+	1,55
16	+	+	-	+	-	-	+	+	+	2,40
17	+	+	0	+	0	0	+	0	0	2,00
18	+	+	+	+	+	+	+	+	+	1,90

В таблице x_1, x_2, x_3 – кодированные уровни факторов (± 1 для двух уровней и $x_1 = \pm 1$ и 0 для трех факторов). Для количественных факторов (диаметр образцов x_2) кодированные уровни определяются 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 i -го фактора; \tilde{x}_i , $\tilde{x}_{i\max}$ и $\tilde{x}_{i\min}$ – текущее, максимальное и минимальное значения i -го фактора в натуральных единицах.

Для качественных факторов выбор уровня произвольный. После статистической обработки результатов эксперимента по методике работы [5] и проверки значимости коэффициентов уравнения получена адекватная модель

$$y = \beta = 1,38 + 0,41x_1 - 0,23x_2 - 0,09x_1x_2 - 0,13x_2x_3 + 0,5x_2^2 \quad (2)$$

$(S_{ад}^2 = \sum_1^N \Delta y_u^2 / (N - m) = 0,02159, F_{расч} = S_{ад}^2 / S_y^2 = 2,08 < F_{кр} = 2,3$ при $\alpha = 0,05, f_1 = 12$ и $f_2 = 18$). Здесь N – число строк (опытов) в матрице; Δy_u – разность расчетного и экспериментального параметра оптимизации в u -й строке ($\Delta y_u = y_{расч} - y_{эксп}$); m – число значимых коэффициентов в уравнении (2); F – критерий Фишера; α – уровень значимости (доверия); f_1 – число степеней свободы дисперсии адекватности $S_{ад}^2$, равное $a = N - m$; f_2 – число степеней свободы параметра оптимизации S_y^2 .

Анализ уравнения (2) показывает, что наибольшее влияние на коэффициент эффективности β оказывает форма образца (без концентратора и с концентратором напряжений), т. е. фактор x_1 ; затем диаметр образца (x_2). Влияние способа упрочнения невелико и проявляется лишь во взаимодействии с первым и вторым факторами. Максимальная эффективность ($\beta = 2,55$) получена при $x_1 = +1$ (образец с концентратором), $x_2 = -1$ (диаметр образца 8 мм) и $x_3 = 0$ (азотирование), т. е. упрочняющая обработка наиболее эффективна на образцах с концентраторами (см. табл. 1, опыты 10–12). При этом следует отметить, что во всех случаях упрочнение образцов, имеющих меньший диаметр, наиболее эффективно.

Из двух способов упрочнения деталей следует обратить внимание на электромеханическую обработку (ЭМО), которая позволяет еще больше повысить надежность и долговечность деталей [6].

Сравнительные испытания усталостной прочности проводились по методике, установленной ГОСТ 2860–85 на машине НУ при $n = 3000$ об/мин, которая позволяет исследовать явление усталост-

ной прочности чистым изгибом не только в опасном сечении, но и на всей длине рабочей части образца.

Образцы изготавливали из стали 40X (HB 212). Диаметр рабочей части $9,48 \pm 0,01$ мм, длина 96 мм. Все образцы после токарной обработки были подвергнуты нормализации, а затем шлифовались. Одна из групп шлифованных образцов подвергалась ЭМО в два прохода со следующим режимом: $I = 210$ А; $n = 246$ об/мин; $S = 0,2$ мм/об. Этим обеспечивались высокая поверхностная микротвердость ($H_{\mu} 546$) и светлая микроструктура поверхностного слоя образца.

Наибольшее напряжение изгиба определялось по формуле

$$\sigma_{\max} = M/W = Pl_0/W, \quad (3)$$

где M – изгибающий момент в рабочих сечениях образца; W – момент сопротивления изгибу сечения образца; l_0 – расстояние между центрами опорного и грузового подшипников; P – нагрузка на каждый грузовой подшипник.

Для проведения эксперимента был выбран план 2×3 , где 2 – два уровня способа обработки (шлифование и ЭМО), а 3 – три уровня рабочего напряжения (320, 340 и 360 МПа). В качестве параметра оптимизации было выбрано число циклов до разрушения ($y = N \cdot 10^6$), а в качестве факторов – способ обработки.

Ошибку воспроизводимости определяли по результатам пяти параллельных опытов при испытании шлифованных образцов при $\sigma = 340$ МПа. Она оказалась равной $0,04N \cdot 10^6$ циклов.

Матрица плана и результаты эксперимента приведены в табл. 2. В таблице x_1 и x_2 – кодированные уровни способа обработки ($x_1 = -1$, шлифование; $x_1 = +1$, ЭМО) и напряжений ($x_2 = -1, 320$ МПа; $x_2 = 0, 340$ МПа и $x_2 = +1, 360$ МПа).

После статистической обработки результатов эксперимента по методике работы [5] и проверки значимости коэффициентов уравнения получена адекватная модель

$$y_2 = N \cdot 10^6 = 0,75 + 0,50x_1 - 0,58x_2 - 0,33x_1x_2 + 0,13x_2^2. \quad (4)$$

Из уравнения (4) видно, что второй фактор (x_2) оказывает большее влияние на долговечность, чем способ обработки (x_1).

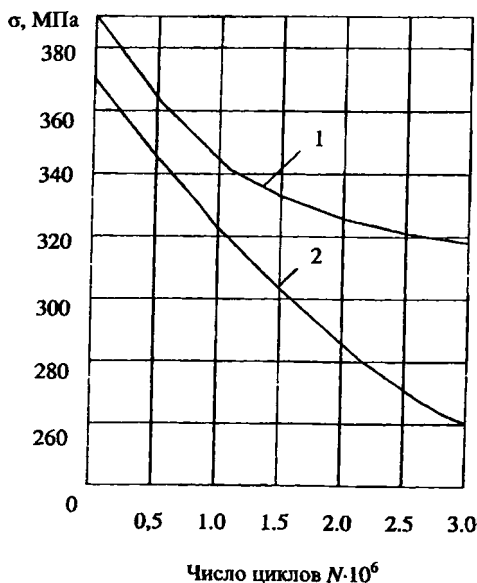
Таблица 2. Матрица плана 2×3

<i>N</i>	x_1	x_2	$x_1 x_2$	x_2^2	$Y_{\text{уст}}$	$Y_{\text{расч}}$
1	-	-	+	+	0,6	0,63
2	-	0	0	0	0,3	0,25
3	-	+	-	+	0,1	0,14
4	+	-	-	+	2,3	2,70
5	+	0	0	0	1,2	1,25
6	+	+	+	+	0,5	0,44

Максимальная долговечность ($\hat{y}_2 = 2,7 \cdot 10^6$ циклов) получена при $x_1 = +1$ (ЭМО) и $x_2 = -1$ ($\sigma = 320$ МПа), что видно из результатов опыта 7. Из табл. 2 и уравнения (4) также видно, что ЭМО при всех напряжениях обеспечивает гораздо большую долговечность по сравнению со шлифованными образцами (в 4–5 раз).

Кривые усталостной прочности образцов стали 40Х после ЭМО и шлифования представлены на рисунке.

Таким образом, электромеханическая обработка (ЭМО) позволяет значительно повысить усталостную прочность и долговечность сталей и деталей.



Кривые усталостной прочности образцов стали 40Х: 1 – после ЭМО; 2 – после шлифования

ЛИТЕРАТУРА

1. Терентьев В. Ф. Усталостная прочность металлов и сплавов. – М.: Интермет Инжиниринг, 2002. – 288 с.
2. Кравчук В. С., Абу Айаш Юсеф, Кравчук А. В. Сопротивление деформированию и разрушению поверхностно-упрочненных деталей машин и элементов конструкций. – Одесса: Астропринт, 2000. – 160 с.
3. Одинг И. А. Допускаемые напряжения в машиностроении и циклическая прочность металлов. – М.: Машгиз, 1962. – 260 с.
4. Серенсен С. В., Когаев В. П., Шнейдерович Р. М. Несущая способность и расчет деталей машин на прочность. – М.: Машгиз, 1963. – 451 с.
5. Вознесенский В. А. Статистические методы исследования в технико-экономических исследованиях. – М.: Статистика, 1974. – 192 с.
6. Аскинази Б. М. Упрочнение и восстановление деталей электромеханической обработкой. – Л.: Машиностроение, 1977. – 184 с.