

ченные из отходов инструментальных сталей, состоят из карбидных частиц (изолированных друг от друга) угловатой формы, находящихся в мартенситно-аустенитной матрице. При этом количество аустенита в основе может колебаться в широких пределах – от 5 до 60 % в зависимости от температурно-временных параметров ХТО.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Хрущев, М. Н. Износостойкость и структура твердых наплавов / М. Н. Хрущев, М. А. Бабичев, Е. С. Беркович. – М.: Машиностроение, 1971.
2. Лифшиц, Л. С. Наплавочные материалы и технология наплавки для повышения износостойкости и восстановление деталей машин / Л. С. Лифшиц // Сварочное производство. – 1991. – № 1. – С. 15–17.
3. Мельников, А. И. Исследование и разработка износостойкого сплава для наплавки деталей, подверженных ударноабразивному изнашиванию: автореф. ... канд. техн. наук / А. И. Мельников. – Свердловск, 1977.
4. Мамаев, П. И. Исследование и разработка наплавочных сплавов в условиях абразивного изнашивания и технология их наплавки: автореф. ... докт. техн. наук / П. И. Мамаев. – М.; Киев, 1982.
5. Гудремон, Э. Специальные стали / Э. Гудремон; пер. с нем. – М.: Металлургиядат, 1959. – Т. 2.

УДК 621.785.5

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

## ВЛИЯНИЕ СПОСОБА УПРОЧНЕНИЯ НА СТРУКТУРУ, ПРОЧНОСТЬ И ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ СТАЛИ 60ХФА

Использование предварительной термомеханической обработки (ПТМО) обеспечивает повышение механических свойств и эксплуатационных характеристик ряда деталей, таких как валы, оси, болты. По сравнению с серийной технологией ПТМО обеспечивается повышение износостойкости в среднем на 25 %, предела прочности  $\sigma$ , на 15–20 %. ПТМО может применяться для упрочнения галтельных переходов коленчатых валов двигателей внутреннего сгорания.

Представляется весьма перспективным применение ПТМО для повышения прочностных и эксплуатационных свойств стали 60ХФА. В настоящей работе было опробована ПТМО этой стали после поверхностного пластического деформирования (ППД) чеканкой. В качестве образцов для исследования использовали заготовки диаметром 40 мм и длиной 450–500 мм. Согласно традиционной технологии предварительная термическая обработка (закалка от  $870 \pm 10$  °С в масле и отпуск при 670 °С в течение 2 ч) проводилась для повышения прочности и износостойкости изделий из стали 60ХФА. Для получения более высоких прочностных свойств чеканку выполняли вибрирующим роликом с использованием пневматического молотка КМ-3 (диаметр – 65 мм, толщина – 5 мм, профильный радиус – 2,5 мм) с частотой 1200 ударов в минуту.

Режимы упрочнения выбирали по априорным данным [2], которые варьировали по одному параметру – энергии удара (0; 6,4; 10; 15 Н·м) для получения оптимальной величины наклепа; остальные параметры выбраны на одном уровне: частота ударов – 1200 в мин; давление воздуха – 5 атм, скорость вращения заготовки – 1 об/мин за два прохода роликом. Глубина наклепанного слоя при этом  $\sim 0,07\text{--}0,08R$ , где  $R$  – радиус образца.

Образцы 10×500 мм вырезали для сравнения данного режима термообработки (закалка ТВЧ  $870 \pm 10$  °С в масле, отпуск при 180 °С в течение 1,5 ч) с упрочнением ППД. Испытания на износ проводили при нагрузке 1000 Н на машине МИ-1М с 10%-ым проскальзыванием на базе  $10^5$  циклов и выбирали исходя из условий эксплуатации изделий. При больших нагрузках происходит схватывание трущихся поверхностей.

Для проведения эксперимента был выбран двухфакторный план  $3 \times 3$ , где 3 – три уровня способа упрочнения (1 – высокотемпературная термомеханическая обработка; 2 – поверхностная ПТМО; 3 – закалка с нагревом ТВЧ) и три уровня числа циклов. В качестве параметра оптимизации был выбран износ ( $J \cdot 10^4$ , г/мм<sup>2</sup> =  $y_1$ ). Ошибка воспроизводимости опытов составляла 1,25 ( $S_y = 1,25$ ). Матрица плана  $3 \times 3$  и результаты эксперимента приведены в табл. 1. В этой таблице  $N$  – номер строки;  $x_1$  и  $x_2$  – кодированные уровни факторов. Опыты проводили в случайном порядке.

Таблица 1. Матрица плана 3×3

№	$x_1$	$x_2$	$x_1x_2$	$x_1^2$	$x_2^2$	$y_1 = J \cdot 10^4, \text{ г/мм}^2$	$y_2 = \sigma_n, \text{ МПа}$
1	-	-	+	+	+	5,0	3557
2	-	0	0	+	0	23,3	3743
3	-	+	-	+	+	46,6	3652
4	0	-	0	0	+	13,3	3943
5	0	0	0	0	0	36,7	4100
6	0	+	0	0	+	66,7	4000
7	+	-	-	+	+	16,7	4324
8	+	0	0	+	0	46,7	4500
9	+	+	+	+	+	80,0	4430

После статистической обработки результатов эксперимента и проверки значимости коэффициентов уравнения получена адекватная модель

$$y_1 = J \cdot 10^4 = 37,23 + 11,42x_1 + 26,38x_2 + 5,43x_1x_2 - 2,52x_1^2 + 2,48x_2^2. \quad (1)$$

Из этого уравнения видно, что наибольшее влияние на износ стали 60ХФА оказывает число циклов нагружения ( $x_2$ ); влияние способа упрочнения ( $x_1$ ) меньше. Минимальный износ ( $y_1 = 5$ ) получен, когда оба фактора были на нижнем уровне, что вполне естественно. Износ образцов после закалки ТВЧ ( $x_1 = +1$ ) при прочих условиях больше, чем у образцов, подвергнутых ВТМО ( $x_1 = -1$ ) и ПТМО ( $x_1 = 0$ ).

Таким образом, обработка стали 60ХФА ПТМО повышает ее износостойкость по сравнению с закалкой ТВЧ, но в меньшей степени, чем ВТМО. Если в уравнение (1) подставить уровни ( $x_1 = \pm 1$  и  $x_1 = 0$ ) для способов упрочнения, то получим систему уравнений, устанавливающих связь между износом и числом циклов нагружения:

$$\text{для ВПТМО } y_1 = 23,29 + 20,95x_2 + 2,48x_2^2; \quad (1a)$$

$$\text{для ПТМО } y_2 = 37,23 + 26,38x_2 + 2,48x_2^2; \quad (16)$$

$$\text{для закалки ТВЧ } y_3 = 46,13 + 31,81x_2 + 2,48x_2^2. \quad (1в)$$

Из уравнений (1а)–(1в) видно, что при любых условиях с ростом числа циклов ( $x_2$ ) поверхностный износ образцов, подвергнутых ВПТМО, будет меньше, чем обработанных ПТМО и ТВЧ, но при всех способах упрочнения он возрастает (например, при  $x_2 = +1$ ;  $y_1 = 46,72$ ;  $y_2 = 66,09$ ;  $y_3 = 80,42$  г/мм<sup>2</sup>).

Износостойкость поверхности образцов, подвергнутых поверхностной ПТМО с различной степенью деформации, выше износостойкости поверхности образцов, упрочненных закалкой ТВЧ. Зависимость износостойкости от степени деформации имеет экстремальный характер. Повышение энергии деформирования сверх оптимальной (15 Н·м) уменьшает эффект ПТМО, однако во всем исследованном диапазоне износостойкость остается все же более высокой, по сравнению с закалкой ТВЧ. Это подтверждают результаты эксперимента (табл. 2). Значение энергии деформирования при ПТМО, равное 15 Н·м, взято из эксперимента (0; 6,4; 10 и 15) (табл. 2).

Таблица 2. Износ образцов стали 60ХФА при различных удельных энергиях деформирования  $A_{уд}$

$A_{уд}, \text{Н}\cdot\text{м}$	0	5	10	15
$J\cdot 10^4, \text{г}/\text{мм}^2$	97,7	88,0	86,7	82,7

Зависимость износа от  $A_{уд}$  может быть аппроксимирована уравнением:

$$y_2 = 14x^2 - 28,7x + 100, \quad (2)$$

где  $y_2$  – износ, г/мм<sup>2</sup>;  $x$  – энергия деформирования  $A_{уд}$ , Н·м.

Параболическая зависимость износостойкости от энергии деформирования отвечает общим закономерностям, установленным для ТМО (термомеханической обработки). При малых энергиях деформирования ( $A_{уд} < 12$  Н·м) плотность «наведенных» при холодной

деформации дефектов недостаточна для того, чтобы в конечной структуре после закалки и низкого отпуска произошли существенные изменения. При увеличении энергии деформирования свыше оптимальной создаются условия для протекания рекристаллизационных процессов. Результаты, приведенные в табл. 1 и 2, являются средними значениями результатов испытаний пяти образцов, величины среднеквадратического отклонения  $S_1$  и  $S_2$  определяли при вероятности  $P = 95\%$  ( $\alpha = 0,05$ ).

Хотя упрочнение методом поверхностной ПТМО уступает ВТМО, но повышение износостойкости все же значительно (25 %) по сравнению с износом упрочненных образцов высокочастотной закалкой. Это позволяет использовать ПТМО как упрочняющую обработку при изготовлении деталей типа валов, осей, болтов.

В другой серии опытов исследовали влияние способа деформации (холодная пластическая деформация и поверхностная термомеханическая обработка) и степени деформации ( $\varepsilon$ , %) на физическое уширение линий  $(110)_\alpha$  и  $(211)_\alpha$  с целью установления интенсивности текстурных максимумов при рассматриваемых выше видах поверхностной обработки.

Кристаллографическую текстуру стали 60ХФА, созданную холодным наклепом и ПТМО, изучали методом построения полюсных фигур  $\{110\}$ . Ширину интерференционных линий  $(110)_\alpha$  и  $(211)_\alpha$  определяли на дифрактометре УРС-50ИМ со сцинтилляционным счетчиком в железном излучении анода.

Для проведения эксперимента был использован план  $2 \times 3$ , где 2 – два способа упрочнения (холодная деформация и ПТМО), а 3 – три уровня степени деформации (15, 30 и 45 %). Ошибку воспроизводимости опытов определяли по результатам испытаний  $\varepsilon = 30\%$  ( $x_2 = 0$ ) пяти образцов. Они соответственно составили 0,19 и 0,37 для линий  $(110)_\alpha$  и  $(211)_\alpha$ . В качестве параметров оптимизации были выбраны физическое уширение этих линий  $y = \beta \cdot 10^{-3}$ , рад, а в качестве факторов – способ упрочнения и степень деформации. Матрица плана  $2 \times 3$  и результаты измерений величины физического уширения этих линий приведены в табл. 3. В этой таблице  $y_3$  и  $y_4$  – величины физического уширения линий  $(110)_\alpha$  и  $(211)_\alpha$ ;  $x_1$  и  $x_2$  – кодированные уровни факторов ( $x_1 = -1$  соответствует холодной

деформации;  $x_2 = +1$  – ПТМО). Кодированные уровни степени деформации определяли по формуле

$$x_i = \frac{\tilde{x}_i - 0,5(\tilde{x}_{i\max} + \tilde{x}_{i\min})}{0,5(\tilde{x}_{i\max} - \tilde{x}_{i\min})}, \quad (3)$$

где  $x_i$  – кодированный уровень, а  $\tilde{x}_i$ ,  $\tilde{x}_{i\max}$  и  $\tilde{x}_{i\min}$  – натуральные значения текущего, максимального и минимального уровней степени деформации (15 и 45 %), № – номер опыта. Для упрощения записи единица ( $x_i = \pm 1$ ) в матрице (табл. 3) отсутствует.

Таблица 3. Величина физического уширения линий  $(110)_\alpha$  и  $(211)_\alpha$

№	$x_1$	$x_2$	$x_1x_2$	$x_2^2$	$y_3 = \beta \cdot 10^{-3}, (110)_\alpha$	$y_4 = \beta \cdot 10^{-3}, (211)_\alpha$
1	–	–	+	+	1,2	3,0
2	–	0	0	0	1,8	3,3
3	–	+	–	+	2,1	3,6
4	+	–	–	+	5,7	8,4
5	+	0	0	0	6,0	12,6
6	+	+	+	+	6,0	13,2

После статистической обработки результатов эксперимента по методике [1] получены два адекватных уравнения ( $F_p = 1,66$  и  $7,9 < 13,74 = F_{кр}$  при  $\alpha = 0,01$  и степенях свободы  $f_1 = 3$  и  $f_2 = 5$ ):

$$y_3 = 3,9 + 2,1x_1 + 0,3x_2 - 0,15x_1x_2; \quad (4)$$

$$y_4 = 7,95 + 4,05x_1 + 1,35x_2 + 1,05x_1x_2 - 0,9x_2^2. \quad (5)$$

Анализ уравнений (4) и (5) показывает, что наибольшее влияние на ширину линий оказывает способ обработки (холодное деформирование и ПТМО). При ПТМО ( $x_1 = +1$ ) ширина обеих линий намного больше, чем при холодном деформировании. Влияние степени деформации ( $x_2$ ) существенно меньше. Видно, что наблюдается корреляция между изменением физического уширения рентгеновских линий  $(110)_\alpha$  и  $(211)_\alpha$  в высокопрочном состоянии и непосредственно после холодного наклепа, что свидетельствует о на-

следственном влиянии холодной пластической деформации на структуру стали 60ХФА после ПТМО. Этот вывод подтверждается высоким значением коэффициента парной корреляции между  $y_1$  и  $y_2$  ( $r_{1,2} = 0,95$ , что больше табличного  $r_{кр} = 0,9172$  при  $\alpha = 0,01$  и  $f = n - 2 = 4$ ).

В результате применения комбинированной схемы упрочнения (деформация + ПТМО или наоборот) удастся получить не только более износостойкую поверхность стали 60ХФА, но и высокие значения прочностных характеристик, что показано в следующем эксперименте.

Испытания на растяжение проводили по методике [2] с использованием гидравлической машины ИМЧ-30 с постоянной скоростью деформирования 0,36 мм/мин; величину нагрузки записывали через каждые 0,005 мм измерения диаметра (одно деление лимба), что соответствует шагу 1,7 %. При испытании 30 закаленных образцов наблюдался разброс значений напряжений течения  $\pm 120$  МПа, т. е. примерно 4 % от измеряемого напряжения. Для получения среднеквадратической ошибки  $\sim 5$  % от средней величины 30 образцов вполне достаточно; увеличение числа образцов более 30 не внесет существенных изменений в величину ошибки воспроизводимости.

Для проведения эксперимента был выбран тот же план  $3 \times 3$ , где 3 – три уровня холодной деформации (15; 38 и 60 %) и три уровня относительного сужения  $\psi$  (5; 13 и 20 %).

В качестве параметра оптимизации  $y_5$  было выбрано напряжение растяжения  $S$  (МПа), а в качестве факторов – степень холодной деформации  $x_1$  и относительное сужение  $x_2$ .

Матрица плана и результаты испытаний приведены в табл. 1 (последний столбец).

После статистической обработки результатов эксперимента и проверки значимости коэффициентов уравнения получена адекватная модель в виде полинома второго порядка

$$y_5 = 4077 + 381x_1 + 45x_2 - 53x_1x_2 - 93x_2^2.$$

Анализ этого уравнения показывает, что наибольшее влияние на прочность закаленных образцов стали 60ХФА оказывает степень

холодной деформации ( $x_1$ ), влияние сужения ( $x_2$ ) существенно меньше.

Таким образом, в результате применения комбинированной схемы упрочнения (ПТМО) удается получить более высокие значения прочностных характеристик и износостойкости изделий из стали 60ХФА. По-видимому, повышение прочностных свойств можно объяснить изменениями в тонкой структуре стали, связанными с влиянием предварительной холодной деформации.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Жарский, И. М.* Планирование и организация эксперимента: учеб. пособие / И. М. Жарский, Б. А. Каледин, И. Ф. Кузьмицкий. – Минск: БГТУ, 2004. – 179 с.
2. Предварительная термомеханическая обработка сталей / М. Л. Бернштейн [и др.] // *Металловедение и термическая обработка металлов.* – 1978. – № 1. – С. 27–31.

УДК 621.793

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

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ БОРОХРОМИРОВАНИЯ НА ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ УЗЛА ТРЕНИЯ**

С целью увеличения износостойкости, коррозионной стойкости, теплостойкости в 1,5–2,0 раза поверхностный слой металла насыщают бором совместно с другими легирующими элементами. В настоящей работе приведены результаты решения задачи по разработке и реализации методики определения оптимальных режимов борохромирования металлов, минимизирующих их износ с применением математических методов планирования эксперимента.

Априорная информация и предварительно проведенные опыты по исследованию указанных выше свойств никелевых покрытий показали, что основными факторами, существенно влияющими на