

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

СОПРОТИВЛЕНИЕ ХРУПКОМУ РАЗРУШЕНИЮ СТАЛЕЙ 26Х2НВМБР (КВК26) И 42Х2НВМБР (КВК42) ПОСЛЕ ДЕФОРМАЦИИ В МАРТЕНСИТНОМ СОСТОЯНИИ

Для решения задач практического применения метода деформационного упрочнения закаленных сталей необходимо выявить закономерности влияния этого метода на свойства, в совокупности характеризующие конструктивную прочность и эксплуатационную надежность материала. Получение весьма высоких показателей прочности, например, предела прочности σ_b , не равноценно повышению указанных свойств. Подобные характеристики не позволяют достаточно уверенно прогнозировать поведение высокопрочных сталей в реальных условиях. Изделия могут иметь различные повреждения поверхности, испытывать воздействие сложнапряженного состояния, коррозионной среды и т.п.

Для установления пределов безопасной работы изделий при максимальном использовании внутренних резервов прочности материала необходимо определение параметров, характеризующих его сопротивление хрупкому разрушению.

Сведения о влиянии деформации мартенсита на сопротивление сталей хрупкому разрушению весьма противоречивы [1–3]. Объясняется это двоякой ролью самой пластической деформации. С одной стороны, пластическая деформация создает локальные перенапряжения, подготавливающие условия для начала разрушения, а с другой – появление этих перенапряжений может инициировать вторичную деформацию, уменьшающую напряжения и задерживающую разрушение.

В свою очередь, в процессе деформации действуют конкурирующие структурные факторы. Во-первых, при пластической деформации повышается плотность дислокаций и их блокировка примесями атомами, что вызывает упрочнение стали; во-вторых, в

той или иной степени происходит распад мартенсита, способствующий увеличению подвижности дислокаций, что определяет повышение пластичности металла, возможность релаксации напряжений вблизи скоплений дефектов кристаллической решетки, и в связи с этим уменьшение склонности материала к хрупкому разрушению. Преобладающее влияние того или другого фактора зависит от легирования стали, условий проведения деформации (наличие отпуска до и после деформации, способа и степени деформации) и условий испытаний.

По литературным данным [4–6] деформационное старение закаленных высокопрочных сталей на одни характеристики механических свойств влияет отрицательно, на другие положительно, что не позволяет сделать однозначный вывод о пользе или вреде указанной обработки.

В связи с этим в данной работе исследовано влияние пластической деформации в мартенситном состоянии и температуры испытаний на сопротивление хрупкому разрушению среднелегированных конструкционных сталей типа КВК26, % (0,25 С; 1,8 Сr; 0,52 Ni; 0,52 Si; 0,79 Mn; 0,17 Mo; 0,42 W) и КВК42, % (0,42 С; 2,1 Cr; 0,72 Ni; 0,56 Si; 0,69 Mn; 0,18 Mo; 0,4 W).

В качестве параметра оптимизации ($y = KCU$) была выбрана ударная вязкость KC , $кДж/м^2$, а в качестве факторов: марки стали ($x_1 = -1$, КВК42; $x_1 = +1$, КВК26); вид обработки ($x_2 = -1$, закалка + отпуск; $x_2 = 0$, закалка + отпуск + деформация 15 % + отпуск; $x_2 = +1$, закалка + отпуск + деформация 20 % + отпуск) и температура испытания $^{\circ}C$ ($x_3 = -1$, 0 $^{\circ}C$; $x_3 = 0$, -40 $^{\circ}C$; $x_3 = +1$, -80 $^{\circ}C$), т.е. был проведен трехфакторный эксперимент по плану $N = 2 \times 3 \times 3 = 18$, где N – число опытов (строк): 2 – два уровня марки стали, а 3 – три уровня обработки и три уровня температуры испытаний.

Закалка образцов сталей проводилась при температуре 950 $^{\circ}C$ (охлаждение в масле): отпуск после закалки при температуре 200 $^{\circ}C$, отпуск после деформации – при 300 $^{\circ}C$.

Среднеквадратическая ошибка эксперимента S_y , составляла 26,2 $кДж/м^2$, то есть примерно 5 % от средней величины $\bar{y} = 524$ $кДж/м^2$. Опыты проводились в случайном порядке.

Матрица плана и результаты испытаний приведены в таблице 1. Выбор в качестве показателя хрупкой прочности ударной вязкости

КС объясняется тем, что эта характеристика во многом определяет сопротивление материала хрупкому разрушению.

Таблица 1 – Матрица плана 2×3×3 и результаты испытаний сталей КВК26 и КВК42 при низких температурах

№	x_1	x_2	x_3	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	$x_2 x_3$	x_2^2	x_3^2	$y = KCU,$ кДж/м ²
1	-	-	-	+	+	+	+	+	460
2	-	-	0	+	0	0	+	0	281
3	-	-	+	+	-	-	+	+	272
4	-	0	-	0	+	0	0	+	430
5	-	0	0	0	0	0	0	0	256
6	-	0	+	0	-	0	0	+	205
7	-	+	-	-	+	-	+	+	390
8	-	+	0	-	0	0	+	0	222
9	-	+	+	-	-	+	+	+	190
10	+	-	-	-	-	+	+	+	950
11	+	-	0	-	0	0	+	0	730
12	+	-	+	-	+	-	+	+	720
13	+	0	-	0	-	0	0	+	880
14	+	0	0	0	0	0	0	0	700
15	+	0	+	0	+	0	0	+	640
16	+	+	-	+	-	-	+	+	820
17	+	+	0	+	0	0	+	0	660
18	+	+	+	+	+	+	+	+	620
$\sum_{i=1}^n y_i$	4014	-511	-1213	-89	-57	18	6316	6577	9426
код	(1Y)	(2Y)	(3Y)	(12Y)	(13Y)	(23Y)	(22Y)	(33Y)	(0Y)

Статистическую обработку результатов проводили по методике работы [7]. Предполагалось, что связь между ударной вязкостью и факторами можно выразить в виде уравнения регрессии:

$$y = KCU = \epsilon_0 + \epsilon_1 x_1 + \epsilon_2 x_2 + \epsilon_3 x_3 + \epsilon_{12} x_1 x_2 + \epsilon_{13} x_1 x_3 + \epsilon_{23} x_2 x_3 + \epsilon_{11} x_1^2 + \epsilon_{22} x_2^2 + \epsilon_{33} x_3^2. \quad (1)$$

Коэффициенты уравнения (1) определили по формулам:

$$\epsilon_0 = A_0(OY) - A_{01}(11Y) - A_{02}(22Y) - A_{03}(33Y); \quad (2)$$

$$\epsilon_1 = A_1(1Y); \quad \epsilon_2 = A_2(2Y); \quad \epsilon_3 = A_3(3Y); \quad (3)$$

$$\epsilon_{12} = A_{12}(12Y); \quad \epsilon_{13} = A_{13}(13Y); \quad \epsilon_{23} = A_{23}(23Y); \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \epsilon_{11} &= A_{11}(11Y) - A_{01}(OY); \quad \epsilon_{22} = A_{22}(22Y) - A_{02}(OY); \\ \epsilon_{33} &= A_{33}(33Y) - A_{03}(OY). \end{aligned} \quad (5)$$

Значения коэффициентов $A_0, A_{01}, A_{02}, A_{03}, A_{12}, A_{13}, A_{23}, A_{11}, A_{22}$ и A_{33} брали из [7, таблица 2.21]. Для плана $2 \times 3 \times 3$ они соответственно составили $A_0 = 0,27778; A_{01} = 0; A_{02} = A_{03} = 0,16667; A_1 = 0,05556; A_2 = A_3 = 0,08333; A_{12} = A_{13} = 0,0833; A_{23} = 0,125; A_{11} = 0; A_{22} = A_{33} = 0,25$.

Выражения в скобках $(OY) \dots (33Y)$ – это алгебраические суммы произведений столбца $y = KCU$ на соответствующие столбцы матрицы (приведены в нижней строке $\sum_{i=1}^n y_i$).

В результате расчетов по формулам (2)–(5) получили следующие значения коэффициентов ϵ_i : $\epsilon_0 = 499,5 \cong 500; \epsilon_1 = 223; \epsilon_2 = -42,6; \epsilon_3 = -107; \epsilon_{12} = -7,4; \epsilon_{13} = -4,75; \epsilon_{23} = 2,25; \epsilon_{11} = 0; \epsilon_{22} = 8; \epsilon_{33} = 73,25$.

Проверку значимости этих коэффициентов проводили путем сравнения их абсолютных значений с их доверительными интервалами, определяемыми по формуле:

$$\Delta \epsilon_i = \pm t \cdot S_y \cdot \sqrt{A_i}, \quad (6)$$

где t – критерий Стьюдента, берущийся из статистических таблиц ($t = 1,73$ при $\alpha = 0,1, f = 17$).

Доверительные интервалы оказались равны: $\Delta \epsilon_1 = 10,67 < 223; \Delta \epsilon_2 = \Delta \epsilon_3 = 13,1 < 42,6; \Delta \epsilon_{12} = \Delta \epsilon_{13} = 13,1; \Delta \epsilon_{23} = 16; \Delta \epsilon_{22} = \Delta \epsilon_{33} = 22,6$.

Таким образом, коэффициенты $\epsilon_{12}, \epsilon_{13}, \epsilon_{23}$ и ϵ_{22} незначимы (равны 0). Уравнение регрессии будет таким:

$$y = KCU = 500 + 223x_1 - 43x_2 - 107x_3 + 73x_3^2. \quad (7)$$

Проверка адекватности этого уравнения подтвердила эту гипотезу, т.к. дисперсия адекватности $S_{ад}^2 = \frac{\sum \Delta y_n^2}{N - m}$, где m – число значимых коэффициентов, включая θ_0 , оказалось равным 1103,231, а критерий Фишера $F = \frac{1103,231}{686} = \frac{S_{ад}^2}{S_y^2} = 1,61 < F = 2,4$ при $x = 0,05$,

$f_1 = 13$ и $f_2 = 17$.

Таким образом, можно сделать вывод, что наибольшее влияние на ударную вязкость a_n оказывает марка стали (x_1). Влияние способа обработки (x_2) и температуры испытаний (x_3) существенно меньше.

Максимальная величина КСУ = 950 кДж/м² будет у стали КВК26 ($x_1 = +1$) после закалки и отпуска ($x_2 = -1$) при температуре испытаний 0 °С ($x_3 = -1$).

Минимальная величина КСУ = 190 кДж/м² получена у стали КВК42 ($x_1 = -1$) после закалки + отпуск + деформация $\epsilon = 20\%$ + отпуск ($x_2 = +1$) при температуре испытаний –80 °С ($x_3 = +1$).

Следует отметить, что во всех случаях сталь КВК26 ($x_1 = +1$) обладает более высокой стойкостью к хрупкому разрушению (более чем в 2 раза) по сравнению со сталью КВК42 ($x_1 = -1$). Особенно это преимущество проявляется при низких температурах испытания (–40 и –80 °С), хотя сталь КВК42 имеет предел прочности (σ_B) примерно равный пределу текучести ($\sigma_{0,2}$) стали КВК26 после закалки и отпуска ($x_2 = -1$).

Если в (7) подставить $x_1 = -1$ и $x_1 = +1$, то получим уравнение регрессии:

для стали КВК42:

$$y_1 = \text{КСУ} = 277 - 43x_2 - 107x_3 + 73x_3^2; \quad (8)$$

для стали КВК26:

$$y_2 = \text{КСУ} = 723 - 43x_2 - 107x_3 + 73x_3^2. \quad (9)$$

Из этих уравнений также видно, что сталь КВК26 обладает более высокой хрупкой прочностью, чем сталь КВК42 после одинаковой обработки при всех температурах испытания.

Так (8) и (9) содержат по одному фактору (x_2) с линейным эффектом и (x_3) – с линейным и квадратичным эффектом ($\epsilon_{22} = \epsilon_{12} = 0$), то эти уравнения описываются эллиптическим параболомидом с выпуклостью вниз ($\epsilon_{33} > 0$). Их изолинии – семейство эллипсов с общим центром.

Если продолжить анализ уравнений (8) и (9), то можно получить семейство уравнений при различных видах обработки ($x_2 = -1$; $x_2 = 0$; $x_2 = +1$).

Для стали КВК42 при $x_2 = -1$ (закалка + отпуск):

$$y_1 = KCU = 320 - 107x_3 + 73x_3^2. \quad (8a)$$

При $x_2 = 0$ (закалка + отпуск + деформация 15 % + отпуск)

$$y_1 = KCU = 277 - 107x_3 + 73x_3^2. \quad (8б)$$

При $x_2 = +1$ (закалка + отпуск + деформация 20 % + отпуск)

$$y_1 = KCU = 234 - 107x_3 + 73x_3^2. \quad (8в)$$

Для стали КВК26 соответственно при $x_2 = -1$; $x_2 = 0$; $x_2 = +1$:

$$y_2 = KCU = 766 - 107x_3 + 73x_3^2; \quad (9a)$$

$$y_2 = KCU = 723 - 107x_3 + 73x_3^2; \quad (9б)$$

$$y_2 = KCU = 680 - 107x_3 + 73x_3^2. \quad (9в)$$

Следовательно, к функциям типа (8) или (9) приложили все правила, относящиеся к интерпретации однофакторных моделей, в частности, положение экстремума (максимума или минимума седловой точки) определяется координатами:

$$x_{iex} = -\epsilon_i / 2 \epsilon_{ii}. \quad (10)$$

Пользуясь этой формулой получили: для стали КВК42 ($x_1 = -1$) при $x_2 = \pm 1,0$; $x_{3ex} = -\frac{107}{2 \cdot 73} = -0,733$; для стали КВК26 x_{3ex} также равен $-0,733$, для $x_2 = \pm 1,0$, т.е. $t = -29,3$ °С.

Значение \bar{y}_{ex} в экстремальной точке определим по формуле:

$$\bar{y}_{ex} = \epsilon_0 - \epsilon_3^2 / 4\epsilon_{33}. \quad (11)$$

Тогда для стали КВК42 при $x_2 = -1$ $y_{1ex} = 281$ кДж/м²; при $x_2 = 0$ $y_{1ex} = 238$ кДж/м²; при $x_2 = +1$ $y_{1ex} = 195$ кДж/м².

Для стали КВК26 соответственно $y_{2ex} = 727$; $y_{2ex} = 684$; $y_{2ex} = 641$ кДж/м².

Дальнейший анализ таблицы 1 и полученных уравнений показывает, что между величиной ударной вязкости для исследуемых сталей существует тесная корреляционная связь.

Действительно, коэффициент парной корреляции, определяемый по формуле:

$$r_{1,2} = \frac{\sum_1^n (y_1 - \bar{y}_1)(y_2 - \bar{y}_2)}{\sqrt{\sum_1^n (y_1 - \bar{y}_1)^2 (y_2 - \bar{y}_2)^2}}, \quad (12)$$

где \bar{y}_1 и \bar{y}_2 – средние значения ударной вязкости стали КВК26 и КВК42, оказался равным:

$$r_{1,2} = \frac{50728}{\sqrt{60572 \cdot 44172}} = 0,981 > \tau_{кр} = 0,7348 \quad \text{при } \alpha = 0,01 \text{ и } n = 9.$$

Следовательно, связь между величиной ударной вязкости этих сталей можно выразить корреляционным уравнением:

$$y_2 = \epsilon_0 + \epsilon_1 \cdot y_1.$$

$$\text{Коэффициент } \epsilon_1 = \frac{\sum_1^n (y_1 - \bar{y}_1)(y_2 - \bar{y}_2)}{\sum_1^n (y_1 - \bar{y}_1)^2} = 0,838 \cong 0,84,$$

$$\text{а } \epsilon_0 = \bar{y}_2 - \epsilon_1 \cdot \bar{y}_1 = 394 - 0,838 \cdot 366 = -331.$$

Таким образом, корреляционное уравнение будет таким:

$$y_2 = KCU = 0,838 - y_1 - 331. \quad (13)$$

Это уравнение также указывает на то, что ударная вязкость стали КВК42 (y_2) будет всегда значительно меньше, чем ударная вязкость стали КВК26.

Полученные результаты можно представить и в графическом виде (рисунок 1).

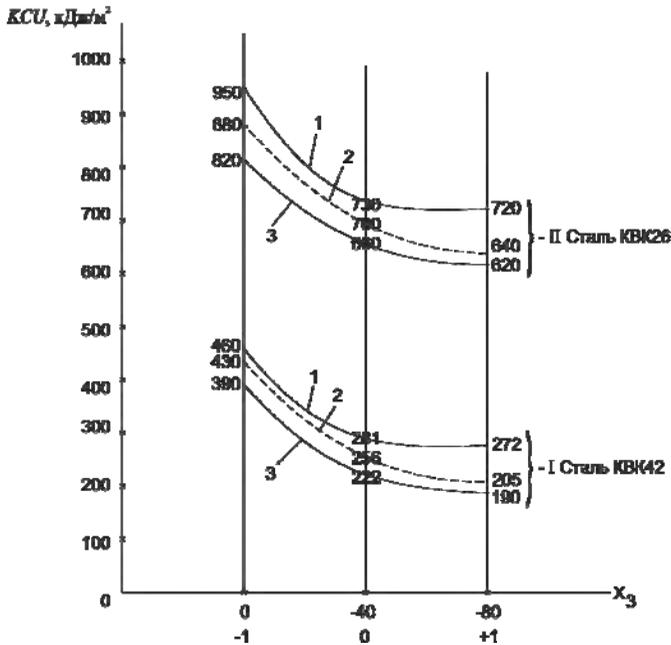


Рисунок 1 – Влияние деформации в мартенситном состоянии и температуры испытаний на ударную вязкость сталей КВК42 и КВК26

Расширение температурного интервала вязкого разрушения вследствие смещения критической температуры хрупкости в сторону более низких температур указывает на рост сопротивления материала хрупкому разрушению. Это связано с повышением несущей способности границ зерен. Повышение прочности границ зерен при обработке закаленных сталей значительной пластической деформацией можно объяснить уменьшением приграничной концентрации дефектов и примесных атомов, благодаря интенсивному развитию

субструктуры. Рафинирование приграничных объемов способствует увеличению эффективной энергии поверхности разрушения [8].

Другой причиной снижения порога хладноломкости является увеличение количества подвижных дислокаций в кристаллической решетке. Подвижные дислокации обеспечивают возможность релаксации локальных «пиковых» напряжений на всех стадиях развития разрушения, что увеличивает сопротивление стали хрупкому разрушению.

При значительной деформации стали в мартенситном состоянии образованию подвижных дислокаций благоприятствует развитие распада мартенсита, который приводит к разблокировке части дислокаций вследствие выделения из матрицы карбидной фазы. Кроме того, выделившиеся дисперсные частицы ускоряют возникновение новых дислокаций в процессе последующей деформации [9].

Таким образом, результаты эксперимента и полученные уравнения регрессии и корреляции подтверждают вывод о том, что сопротивление хрупкому разрушению у стали КВК26 намного больше, чем у стали КВК42 при исследованных уровнях обработки и температуре испытаний.

Литература

1. Влияние деформационного старения на поведение высокопрочных сталей при двухосном растяжении / С.А. Куркин [и др.] // Изв. вузов. Машиностроение. – 1969. – № 2. – С. 51–57.

2. Влияние способа упрочнения на сопротивление разрушению стали в присутствии поверхностного концентратора напряжений / Г.А. Береснев [и др.] // Физика металлов и металловедение. – 1970. – Т. 29. – № 2. – С. 427–428.

3. Влияние старения на свойства стали 32Х2НГСМ, упрочненной деформацией в закаленном состоянии / В.В. Горюшин [и др.] // Физика и химия обработки материалов. – 1976. – № 5. – С. 85–89.

4. Креймерман, Г.И. Структурная устойчивость высокопрочной стали / Г.И. Креймерман, И.В. Пансов // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1965. – № 1. – С. 120–123.

5. Бернштейн, М.Л. Термомеханическая обработка металлов и сплавов: в 2 т. / М.Л. Бернштейн. – М.: Металлургия, 1968. – 1171 с.

6. Романов, О.Н. Вязкость разрушения конструкционных сталей / О.Н. Романов. – М.: Metallurgy, 1979. – 176 с.

7. Вознесенский, В.А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях / В.А. Вознесенский. – М.: Статистика, 1974. – 192 с.

8. Сарак, В.И. Неоднородное распределение внутренних напряжений и склонность стали к хрупкому разрушению / В.И. Сарак, В.Н. Шубин, Р.И. Энтин // Физика металлов и металловедение. – 1970. – № 1. – Т. 29. – С. 143–149.

9. Jonari, O. Structures and Strength of Ausformed Steels – Transactions Quarterly / O. Jonari, G. Thomas // Transactions of American Society for Metals. – 1965. – V. 58, № 4. – P. 563–578.

УДК 621.79 + 669.14

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

АДГЕЗИЯ ПОКРЫТИЙ Ti-N НА МОДИФИЦИРОВАННОЙ СТАЛЬНОЙ ПОДЛОЖКЕ

Введение. Среди современных технологий поверхностного упрочнения деталей машин и механизмов, инструмента и др., проблема покрытий является наиболее обширной. Это связано с наличием широкого спектра материалов покрытий, множеством технологических приемов их получения и многообразием областей их применения и функциональными качествами. Использование покрытий позволяет, по сравнению с другими видами обработки, объединить свойства как минимум двух материалов – подложки и самого покрытия и получить поверхностную слоистую композицию, обладающую свойствами, которые не могут быть получены при использовании одного материала. Одними из наиболее эффективных по ряду показателей для создания износостойких поверхностных слоев и покрытий являются вакуумные ионно-плазменные технологии [1, 2], пришедшие в машиностроение из микромеханики.