

Низкотемпературное упрочнение сталей в условиях неоднородного напряженного состояния и действия импульсов электрического тока

В. А. Стрижало, Л. С. Новогрудский

Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина

Рассмотрена возможность оценки низкотемпературного упрочнения сталей при наличии концентрации напряжений с помощью используемых в инженерной практике коэффициентов конструкционной прочности. Предложена модифицированная система коэффициентов конструкционной прочности, позволяющая учитывать влияние отдельных факторов (криогенной температуры, концентрации напряжений, действия импульсов электрического тока) либо их комбинации на работоспособность сталей при неоднородном напряженном состоянии.

Ключевые слова: концентрация напряжений, криогенная температура, импульсы электрического тока, коэффициент конструкционной прочности.

Введение. Повышение прочности металлических материалов при охлаждении может являться основанием для снижения металлоемкости таких изделий, эксплуатирующихся в области низких и криогенных температур, как емкости для транспортирования и хранения сжиженных газов, энергетические устройства с криогенным охлаждением, сверхпроводящие электромагнитные системы и др. [1–3]. Как правило, для изготовления подобных устройств используют материалы, которые не имеют порога хладноломкости в интервале рабочих температур. Однако наличие конструктивных или технологических концентраторов напряжений может существенно изменить (снизить) их сопротивление пластическому деформированию при низких температурах. Склонность материалов к хрупкому разрушению оценивают по результатам испытаний на растяжение при низких температурах образцов с надрезами. В общем случае благодаря такому подходу можно выделить три основных эффекта: концентрацию напряжений у вершины надреза по отношению к номинальным напряжениям вне его; локализацию пластического течения с повышенной скоростью деформирования в зоне вершины надреза; возникновение сложного (объемное или плоское в зависимости от соотношения размеров образца в надрезе и вне его) деформированного состояния, суммарное действие которых, а также свойства материала и определяют степень его охрупчивания при данной температуре. При криогенных температурах более раннему исчерпанию пластичности в плоскости надреза способствует также действие импульсов электрического тока [4].

При одноосном растяжении работоспособность материалов рекомендуют оценивать на основе анализа температурных зависимостей коэффициентов конструкционной прочности [5, 6]:

$$\alpha = \sigma_B^H / \sigma_B; \quad \alpha' = \sigma_B^H / \sigma_T; \quad K_1 = \sigma_B^H / \sigma_B^{293}; \quad K_2 = \sigma_B^H / \sigma_T^{293}, \quad (1)$$

где σ_B , σ_B^H – пределы прочности материала и образца с надрезом соответственно; σ_T – условный предел текучести при температуре эксплуатации; σ_B^{293} , σ_T^{293} – характеристики материала при температуре 293 К.

Подобный подход, основанный на рассмотрении температурных зависимостей коэффициентов конструкционной прочности, и был использован при изучении прочности цилиндрических образцов с надрезом при воздействии импульсов электрического тока в диапазоне температур 293...4,2 К.

Методика исследования. Объектом исследования служили стали, отличающиеся свойствами: холодопластичная сталь со стабильной в исследуемом интервале температур аустенитной структурой 03X20H16AG6 и экономнолегированная сталь ОН9, склонная при низких температурах к хрупкому разрушению. Испытания при температурах 293, 77 и 4,2 К проводили на гладких цилиндрических образцах с диаметром рабочей части 4 мм и цилиндрических образцах с кольцевым надрезом различной остроты. Радиус в вершине надреза ρ составлял: 0,02; 0,10 и 0,25 при диаметре в наименьшем сечении образца 4 мм. Коэффициенты концентрации напряжений таких образцов рассчитывали с помощью интерполяционной формулы Нейбера [7] с использованием методики, приведенной в [8]:

$$\alpha_\sigma = 1 + \frac{(K_{\sigma_y} - 1)(K_{t_y} - 1)}{\sqrt{(K_{\sigma_y} - 1)^2 (K_{t_y} - 1)^2}}$$

Здесь K_{σ_y} и K_{t_y} – коэффициенты концентрации напряжений для образцов с глубоким и мелким надрезом,

$$K_{\sigma_y} = \frac{1}{N} (a_0/r_0 + 1,5) (\sqrt{(a_0/r_0 + 1) + 1});$$

$$K_{t_y} = 1 + 2\sqrt{t_0/r_0},$$

где $N = 2 + a_0/r_0 + \sqrt{a_0/r_0 + 1}$; a_0 – радиус наименьшего сечения образца, $a_0 = 2$ мм; t_0 – глубина надреза, $t_0 = 1$ мм; r_0 – радиус кривизны в основании теоретической гиперболы в вершине надреза.

Значения r_0 определяли по изложенному в [9] методу путем пересчета значений радиуса кривизны ρ фактически прямолинейного профиля с закруглением у основания. Рассчитанные таким образом величины теоретических коэффициентов концентрации напряжений для используемых параметров надрезов приведены в табл. 1.

Часть образцов испытывали при действии импульсов электрического тока (ИЭТ). Направление действия ИЭТ амплитудой 2,8 кА и длительностью 10^{-2} с было ориентировано вдоль оси образца. Для получения сопоставимых результатов ИЭТ пропускали при определенных уровнях нагрузки P , ниже значение которой устанавливали исходя из условия достижения материалом предела текучести:

$\sigma = 0,6\sigma_{0,2}$ или $P = 0,15\pi d_0^2 \sigma_{0,2}$ – для образцов без надреза;

$\sigma = 0,6\sigma_{0,2}/\alpha_\sigma$ или $P = 0,15\pi d_H^2 \sigma_{0,2}/\alpha_\sigma$ – для образцов с кольцевым

надрезом,

где d_0 – начальный диаметр рабочей части образца без надреза; d_H – начальный диаметр в наименьшем сечении образца с надрезом.

Т а б л и ц а 1

Теоретические коэффициенты концентрации напряжений α_σ
цилиндрических образцов с кольцевым надрезом

ρ , мм	r_0 , мм	K_{σ_y}	K_{t_y}	α_σ
0,02	0,0175	10,69	16,10	9,16
0,10	0,0877	4,81	7,75	4,32
0,25	0,2190	3,10	5,27	2,88

Анализ результатов испытаний. Результаты испытаний образцов с надрезом сталей 03Х20Н16АГ6 и ОН9 без воздействия электрического тока представлены в табл. 2. Как следует из приведенных данных, значения максимальных номинальных напряжений перед разрушением образцов с надрезом для стали 03Х20Н16АГ6 монотонно возрастают с понижением температуры испытаний от 293 до 4,2 К, для стали ОН9 при $\alpha_\sigma = 9,16$ – в интервале температур 293 до 77 К. Для этой стали при $\alpha_\sigma = 9,16$ и охлаждении от 77 до 4,2 К их значения уменьшаются на 285 МПа. Значения эффективных коэффициентов концентрации напряжений α для данной стали в интервале температур 293...77 К изменяются незначительно, с дальнейшим понижением температуры до 4,2 К они уменьшаются, причем наиболее сильно для образцов с максимально острым надрезом. Для стали 03Х20Н16АГ6 величина α практически не зависит от температуры испытаний при всех рассмотренных уровнях концентрации напряжений.

В работе [6] довольно убедительно показано, что эффективный коэффициент концентрации напряжений α и коэффициент α' не дают полной информации о работоспособности материалов в области криогенных температур при наличии концентраторов напряжений. Равные значения этих коэффициентов для различных металлов и сплавов ни в коей мере не свидетельствуют об их одинаковой склонности к хрупкому разрушению: α – характеризует "... только изменение среднего напряжения разрушения при наличии концентратора напряжений ...; α' – показывает, не приводит ли концентрация напряжений к разрушению при напряжениях ниже опасного ($\alpha' < 1$), если нет ($\alpha' > 1$), то каков имеется запас прочности" [6]. Для более полной оценки работоспособности конструкционных материалов при криогенных температурах в [6] предлагается ввести следующие коэффициенты: K_1 – показывающий, как изменяется среднее напряжение разрушения при температуре эксплуатации по сравнению со средним напряжением разрушения при комнатной; K_2 – характеризующий запас прочности при температуре эксплуатации ($K_2 > 1$) либо его отсутствие ($K_2 < 1$). Коэффициенты K_1 и K_2 позволяют оценить низкотемпературное упрочнение металла при пере-

ходе от однородного напряженного состояния к неоднородному, вызванному концентрацией напряжений. Данные об изменении этих коэффициентов также приведены в табл. 2. Для обоснованного учета, собственно, низкотемпературного упрочнения при наличии концентрации напряжений необходимо рассмотреть еще один коэффициент $K^{HTY} = \sigma_B^H / \sigma_B^{H293}$, где σ_B^H – максимальное номинальное напряжение перед разрушением образца с надрезом при низкой температуре; σ_B^{H293} – то же при температуре 293 К; K^{HTY} характеризует степень изменения максимальных номинальных напряжений при понижении температуры. При $K^{HTY} < 1$ низкотемпературное упрочнение отсутствует.

Т а б л и ц а 2

Влияние концентрации напряжений на прочность сталей ОН9 и 03Х20Н16АГ6 в интервале температур 293...4,2 К

T, К	σ_B^H , МПа	α	α'	K_1	K_2
$\alpha_\sigma = 9,16$					
293	1430	1,65	1,96	1,65	1,96
	1070	1,37	2,64	1,37	2,64
77	1940	1,52	2,20	2,24	2,66
	2085	1,37	2,14	2,67	5,15
4,2	1655	1,06	1,35	1,91	2,26
	2440	1,33	1,69	3,13	6,02
$\alpha_\sigma = 4,32$					
293	1440	1,66	1,97	1,66	1,97
	1090	1,40	2,69	1,40	2,69
77	2010	1,57	2,28	2,32	2,75
	2120	1,39	2,17	2,72	5,23
4,2	2125	1,36	1,73	2,46	2,91
	2495	1,36	1,73	3,20	6,16
$\alpha_\sigma = 2,88$					
293	1400	1,62	1,92	1,62	1,92
	1100	1,41	2,72	1,41	2,72
77	2040	1,59	2,32	2,36	2,79
	2150	1,41	2,21	2,76	5,31
4,2	2280	1,46	1,85	2,64	3,12
	2600	1,42	1,81	3,33	6,42

Примечание. Здесь и в табл. 3–5 над чертой приведены значения для стали ОН9, под чертой – для стали 03Х20Н16АГ6.

Как видно из рис. 1, величина K^{HTY} для стали 03Х20Н16АГ6 практически не зависит от концентрации напряжений и равна коэффициенту низкотемпературного упрочнения $\sigma_B^T / \sigma_B^{293}$, где σ_B^T – предел прочности при тем-

пературе испытаний материала в исходном состоянии. Для стали ОН9, структурно-нестабильной в исследуемом интервале температур, наблюдается иная картина. Способность этой стали к низкотемпературному упрочнению снижается с увеличением уровня концентрации напряжений: при $\alpha_\sigma = 9,16 K^{HTY}$ составляет только 63% его значения в случае однородного напряженного состояния, в то время как при $\alpha_\sigma = 2,88 K^{HTY}$ достигает 91% аналогичной величины.

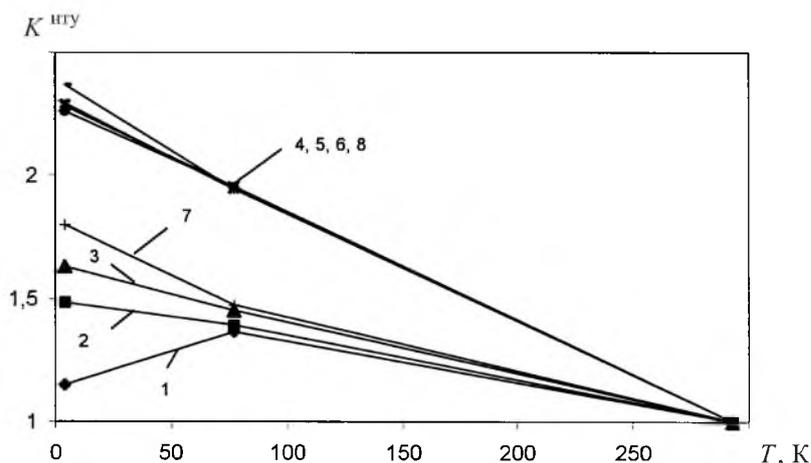


Рис. 1. Влияние охлаждения до 4,2 К на низкотемпературное упрочнение сталей ОН9 (1, 2, 3, 7) и 03Х20Н16АГ6 (4, 5, 6, 8) при наличии концентрации напряжений: 1, 4 – $\alpha_\sigma = 9,16$; 2, 5 – $\alpha_\sigma = 4,32$; 3, 6 – $\alpha_\sigma = 2,88$; 7, 8 – K^{HTY} без концентратора.

При прохождении ИЭТ через образец с надрезом при его статическом растяжении, как и в случае гладких образцов [10], на диаграммах растяжения наблюдаются скачки нагрузки. Амплитуда последних при рассмотренных значениях коэффициентов концентрации напряжений увеличивается с понижением температуры испытаний. При этом амплитуда скачка для образца с надрезом всегда меньше таковой, реализуемой на гладком цилиндрическом образце равного поперечного сечения. Так, для образца с надрезом из стали 03Х20Н16АГ6 при температуре 4,2 К и значении теоретического коэффициента концентрации напряжений $\alpha_\sigma = 4,32$ амплитуда скачка нагрузки при номинальном напряжении 1800 МПа составляет 240 МПа. В то же время на цилиндрическом образце при аналогичной величине напряжений скачок нагрузки при действии ИЭТ достигает 360 МПа. Такое различие в амплитудах скачков нагрузки обусловлено объемом материала, вовлеченного в процесс электропластической деформации.

Результаты испытаний образцов с надрезом из сталей ОН9 и 03Х20Н16АГ6 при воздействии ИЭТ базовых параметров приведены в табл. 3. Сравнительный анализ представленных в табл. 1 и 3 данных позволяет заключить, что при температурах 293 и 77 К воздействие ИЭТ не оказывает существенного влияния на прочность надрезанных образцов из обеих сталей. При температуре жидкого гелия образцы с надрезом разрушаются в момент воздействия ИЭТ по достижении некоторого уровня

нагрузки, что приводит к уменьшению значений σ_B^H . Например, для образцов сталей 03Х20Н16АГ6 и ОН9 с коэффициентом концентрации напряжений 4,32 σ_B^H уменьшается соответственно на 9,0 и 6,0%.

Т а б л и ц а 3

Значения максимальных номинальных напряжений, предшествующих разрушению образцов с надрезом сталей ОН9 и 03Х20Н16АГ6, при воздействии ИЭТ

T, К	$\sigma_{B_{\text{ТОК}}}^H$, МПа, при α_σ		
	9,16	4,32	2,88
293	$\frac{1370}{1065}$	$\frac{1365}{1100}$	$\frac{1395}{1075}$
	$\frac{1935}{2060}$	$\frac{2015}{2060}$	$\frac{2065}{2070}$
4,2	—	$\frac{2035}{2310}$	—
	—	—	—

Рассмотрим, как изменяются коэффициенты, характеризующие влияние концентрации напряжений на прочность материалов, при воздействии ИЭТ на примере образцов сталей с радиусом в вершине кольцевого надреза 0,1 мм (табл. 4). Для стали ОН9 при температурах 293 и 77 К эффективный коэффициент концентрации напряжений практически одинаков, при 4,2 К он несколько уменьшается, для стали 03Х20Н16АГ6 чувствительность к концентрации напряжений при воздействии ИЭТ незначительно понижается при охлаждении от 293 до 77 К.

Т а б л и ц а 4

Коэффициенты, характеризующие влияние концентрации напряжений ($\alpha_\sigma = 4,32$) на прочность сталей ОН9 и 03Х20Н16АГ6, при воздействии ИЭТ в интервале температур 293...4,2 К

T, К	$\alpha_{\text{ТОК}}$	$\alpha'_{\text{ТОК}}$	$K_{1\text{ТОК}}$	$K_{2\text{ТОК}}$	$K_{\text{ТОК}}^{\text{НТУ}}$
293	$\frac{1,58}{1,42}$	$\frac{1,88}{2,85}$	$\frac{1,58}{1,42}$	$\frac{1,88}{2,88}$	$\frac{1,00}{1,00}$
	$\frac{1,60}{1,36}$	$\frac{2,33}{2,68}$	$\frac{2,34}{2,67}$	$\frac{2,77}{5,35}$	$\frac{1,47}{1,88}$
4,2	$\frac{1,31}{1,29}$	$\frac{2,32}{2,64}$	$\frac{2,36}{3,00}$	$\frac{2,81}{6,00}$	$\frac{1,49}{2,10}$

Примечание. $\alpha_{\text{ТОК}} = \sigma_{B_{\text{ТОК}}}^H / \sigma_{B_{\text{ТОК}}}$; $\alpha'_{\text{ТОК}} = \sigma_{B_{\text{ТОК}}}^H / \sigma_{0,2\text{ТОК}}$; $K_{1\text{ТОК}} = \sigma_{B_{\text{ТОК}}}^H / \sigma_{B_{\text{ТОК}}}^{293}$; $K_{2\text{ТОК}} = \sigma_{B_{\text{ТОК}}}^H / \sigma_{0,2\text{ТОК}}^{293}$; $K_{\text{ТОК}}^{\text{НТУ}} = \sigma_{B_{\text{ТОК}}}^H / \sigma_{B_{\text{ТОК}}}^{\text{НТУ}}$.

Значит, как и в исходном состоянии, при воздействии ИЭТ указанные стали не обнаруживают склонности к хрупкому разрушению в исследуемом интервале температур при $\alpha_\sigma = 4,32$.

Различие в величинах эффективных коэффициентов концентрации напряжений при и без воздействия ИЭТ при равных температурах весьма незначительно (не более чем 9,5%). Для стали ОН9 при воздействии ИЭТ коэффициент $\alpha'_{\text{ТОК}}$, характеризующий запас прочности надрезанного образца, с понижением температуры от 293 до 4,2 К увеличивается в 1,23 раза, для стали 03Х20Н16АГ6 он понижается в 1,08 раза, при этом при всех рассмотренных температурах его величина больше двух. При испытаниях без воздействия ИЭТ коэффициент α' также уменьшается с понижением температуры. При температуре жидкого гелия его численное значение не выше двух. Коэффициенты $K_{1\text{ТОК}}$ и $K_{2\text{ТОК}}$ монотонно увеличиваются с понижением температуры испытаний для обеих сталей, причем для стали 03Х20Н16АГ6 более интенсивно. Их величины при температуре 4,2 К меньше соответствующих значений K_1 и K_2 , полученных без воздействия ИЭТ, что указывает на ослабление низкотемпературного упрочнения сталей при изменении вида напряженного состояния и действии ИЭТ. Собственно, для стали 03Х20Н16АГ6 низкотемпературное упрочнение, характеризуемое значением коэффициента $K_{\text{ТОК}}^{\text{НТУ}}$, при воздействии ИЭТ также понижается при всех исследуемых температурах, для стали ОН9 оно возрастает при температуре 77 К и лишь при $T = 4,2$ К не изменяется.

Оценим степень совместного влияния концентрации напряжений и ИЭТ на прочность данных сталей по результатам анализа характера температурных зависимостей коэффициентов:

$$\alpha'_{\text{ТОК}} = \frac{\sigma_{\text{ВТОК}}^{\text{Н}}}{\sigma_{\text{В}}}; \quad \alpha'_{1\text{ТОК}} = \frac{\sigma_{\text{ВТОК}}^{\text{Н}}}{\sigma_{0,2}}; \quad K_{1\text{ТОК}}^1 = \frac{\sigma_{\text{ВТОК}}^{\text{Н}}}{\sigma_{\text{В}}^{293}};$$

$$K_{2\text{ТОК}}^1 = \frac{\sigma_{\text{ВТОК}}^{\text{Н}}}{\sigma_{0,2}^{293}}; \quad K_{1\text{ТОК}}^{\text{НТУ}} = \frac{\sigma_{\text{ВТОК}}^{\text{Н}}}{\sigma_{\text{В}}^{293}}.$$

Как следует из приведенных в табл. 5 данных, эффективный коэффициент концентрации уменьшается по мере понижения температуры для обеих сталей. Обратная зависимость от температуры характерна для коэффициента $K_{1\text{ТОК}}^1$, отражающего также степень влияния охлаждения, т.е. с понижением температуры испытаний от 293 до 4,2 К влияние ИЭТ и концентрации напряжений усиливается. Коэффициенты ($\alpha'_{1\text{ТОК}}$ и $K_{2\text{ТОК}}^1$), характеризующие соотношение пределов прочности надрезанных образцов с пределами текучести при реализуемой и комнатной температурах, для рассматриваемых сталей имеют различные температурные зависимости. Так, если для стали со стабильным аустенитом 03Х20Н16АГ6 с понижением температуры испытаний от 293 до 4,2 К значения $\alpha'_{1\text{ТОК}}$ монотонно уменьшаются в 1,7 раза, а $K_{2\text{ТОК}}^1$ увеличиваются в 2,1 раза, то для стали с нестабильной аустенитной структурой ОН9 при охлаждении от 293 до 77 К величина $\alpha'_{1\text{ТОК}}$ возрастает в 1,2 раза, с дальнейшим понижением температуры до 4,2 К она уменьшается в 1,4 раза, а коэффициент $K_{2\text{ТОК}}^1$ увеличивается в 1,5 раза, а затем практически не изменяется.

Т а б л и ц а 5

Коэффициенты, характеризующие влияние концентрации ($\alpha_\sigma = 4,32$) напряжений и ИЭТ на прочность сталей ОН9 и 03Х20Н16АГ6

T, K	$\alpha_{1\text{ТОК}}$	$\alpha'_{1\text{ТОК}}$	$K_{1\text{ТОК}}^1$	$K_{2\text{ТОК}}^1$
293	1,58	1,87	1,58	1,87
	1,41	2,72	1,41	2,72
77	1,57	2,29	2,33	2,76
	1,36	2,11	2,64	5,09
4,2	1,30	1,65	2,35	2,78
	1,26	1,60	2,96	5,70

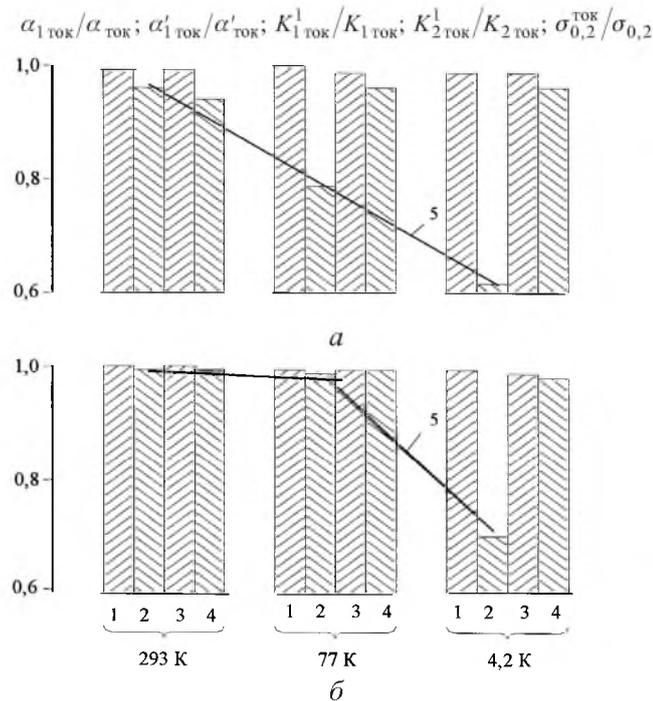


Рис. 2. Влияние охлаждения до 4,2 К на относительное изменение коэффициентов концентрации напряжений сталей 03Х20Н16АГ6 (а) и ОН9 (б): 1 – $\alpha_{1\text{ТОК}}/\alpha_{\text{ТОК}}$; 2 – $\alpha'_{1\text{ТОК}}/\alpha'_{\text{ТОК}}$; 3 – $K_{1\text{ТОК}}^1/K_{1\text{ТОК}}$; 4 – $K_{2\text{ТОК}}^1/K_{2\text{ТОК}}$; 5 – $\sigma_{0,2}^{\text{ТОК}}/\sigma_{0,2}$.

Таким образом, характер температурных зависимостей коэффициентов концентрации напряжений, рассчитываемых только с учетом влияния концентрации напряжений при воздействии ИЭТ, и коэффициентов, определенных с учетом влияния как концентрации напряжений, так и ИЭТ, несколько отличается, что наиболее выражено для стали 03Х20Н16АГ6. Абсолютные значения коэффициентов $\alpha_{\text{ТОК}}$, $K_{1\text{ТОК}}$ для обеих сталей и $K_{2\text{ТОК}}$ для стали ОН9 практически одинаковы во всем интервале низких температур, в то время как $\alpha'_{\text{ТОК}}$, характеризующие запас прочности для сравниваемых случаев, весьма различаются. С понижением температуры испытаний это различие возрастает и фактически соответствует изменению предела текучести материала при воздействии ИЭТ ($\sigma_{0,2}^{\text{ТОК}}/\sigma_{0,2}$) (на рис. 2 кривые 5).

Выводы

1. Из используемых в инженерной практике коэффициентов чувствительности материалов к концентрации напряжений наиболее показательным, позволяющим учитывать как влияние на прочность сталей концентрации напряжений, так и воздействия ИЭТ, является коэффициент α' . Однако он не может использоваться при выборе допускаемых напряжений с учетом низкотемпературного упрочнения, так как не отражает влияния температуры.

2. Низкотемпературное упрочнение материалов при неоднородном напряженном состоянии, вызванном концентрацией напряжений, целесообразно оценивать с помощью коэффициента K^{HTU} , характеризующего изменение максимальных номинальных напряжений с понижением температуры при данном уровне концентрации напряжений как без, так и при воздействии ИЭТ.

3. Воздействие ИЭТ приводит к снижению величины низкотемпературного упрочнения сталей ОН9 и 03Х20Н16АГ6 при неоднородном напряженном состоянии.

4. Запас прочности образцов с кольцевым концентратором напряжений при воздействии ИЭТ определяется степенью изменения предела текучести материала в результате такого действия при соответствующей температуре.

Резюме

Розглянуто можливість оцінки низькотемпературного зміцнення сталей за наявності концентрації напружень за допомогою коефіцієнтів конструкційної міцності, що використовуються в інженерній практиці. Запропоновано модифіковану систему коефіцієнтів конструкційної міцності, що дозволяє враховувати вплив окремих факторів (криогенної температури, концентрації напружень, дії імпульсів електричного струму) або їх комбінації на працездатність сталей в умовах неоднорідного напруженого стану.

1. Писаренко Г. С., Стрижало В. А. О некоторых проблемах низкотемпературного упрочнения металлов и его учета в технике низких температур // Прочность материалов и конструкций при низких температурах. – Киев: Наук. думка, 1984. – С. 3 – 12.
2. Чечин Э. В. Расчет конструкций на прочность с учетом ресурсов пластичности и упрочняемости материалов // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 1999. – № 2. – С. 41 – 52.
3. Mitchell N. Mechanical and electrical desing criteria for ITER magnets. – ITER-JL-MG-1-8-3, 1990. – 45 p.
4. Стрижало В. А., Новогрудский Л. С., Копанев А. А. Влияние электрического тока на процесс деформирования в зоне концентратора напряжений // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1993. – № 8. – С. 44 – 46.
5. Новиков Н. В., Майстренко А. Л., Ульяненко А. П. Конструкционная прочность при низких температурах. – Киев: Наук. думка, 1978. – 232 с.

6. *Лебедев Д. В.* Конструкционная прочность криогенных сталей. – М.: Металлургия, 1976. – 264 с.
7. *Neuber H.* Kerbspannungslehre. – Berlin: Springer-Verlag, 1968. – 29 S.
8. *Петерсон Р.* Коэффициенты концентрации напряжений: Пер. с англ. – М.: Мир, 1979. – 302 с.
9. *Ужик Г. В.* Сопротивление отрыву и прочность металлов. – М.: Изд-во АН СССР, 1950. – 256 с.
10. *Прочность* материалов и конструкций. Р. 4. / В. А. Стрижало, Л. С. Новогрудский, Е. В. Воробьев. Прочность в условиях криогенных температур. – Киев: Академперіодика, 2005. – С. 351 – 439.

Поступила 17. 07. 2006