

Деформирование и прочность легированных сталей при низких температурах в условиях сложного напряженного состояния

А. А. Лебедев, В. П. Ламашевский, И. В. Маковецкий

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

Приведены результаты экспериментальных исследований закономерностей низкотемпературного деформирования некоторых легированных конструкционных сталей при плоском напряженном состоянии, имитирующем условия работы материала в трубно-оболочечных конструкциях. Экспериментальная часть исследований выполнена при нагружении тонкостенных трубчатых образцов осевой силой (растяжение, сжатие) и внутренним давлением, в том числе при низких температурах.

Ключевые слова: легированные стали, механические свойства, низкие температуры, сложное напряженное состояние, деформирование, прочность, условие эквивалентности.

Опубликованные в литературных источниках данные о влиянии низких температур на механические свойства конструкционных материалов получены, как правило, при одноосном растяжении стержневых образцов. Проведение испытаний материалов при сложном напряженном состоянии даже в условиях комнатной температуры представляет большие сложности. В связи с этим диапазон низких температур практически не изучен, хотя с понижением температуры усиливается влияние вида напряженного состояния на характер деформирования и склонность металла к хрупкому разрушению, изменяются законы упрочнения и критерии предельного состояния, снижается пластичность материала [1].

К сожалению, ограниченный объем статьи не позволяет проанализировать все данные, полученные авторами при испытаниях легированных сталей. Поэтому рассмотрим результаты испытаний только трех наиболее применяемых в технике низких температур сталей указанного класса. Их химический состав (%) и никелевый эквивалент (%)

$$Ni_{\text{эКВ}} = Ni + 0,65Cr + 0,98Mo + 1,05Mn + 0,35Si + 12,6C \quad (1)$$

приведены в табл. 1.

Исследование выполнено на испытательном комплексе типа СНТ, созданном в Институте проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины. Комплекс в соответствии с [2] состоит из системы механического нагружения тонкостенного трубчатого образца осевой силой, блока создания в образце высокого внутреннего давления рабочей средой (спирт, изопентан) и вакуумной камеры. Задача одновременного обеспечения стабильных температурных условий испытаний и надежности работы системы измерения деформаций решена комплексно. Необходимый тепловой режим поддерживается путем пропускания жидкого азота через специальный терморегулятор, размещенный

во внутренней полости образца [3], продольные и поперечные деформации рабочей части которого измеряются снаружи на базе 20–25 мм специальным электромеханическим тензометром [4]. Система управления экспериментом и исполнительные органы обеспечивали необходимую точность фиксируемых параметров, обработку и регистрацию опытных данных [5].

Т а б л и ц а 1

Химический состав сталей

Материал	Содержание химических элементов, %											Ni _{экв} , %
	Ni	Cr	Mn	Si	C	P	S	N	Ti	B	Fe	
07X16H6	0,41	16,6	0,38	0,24	0,070	0,01	0,007	–	–	–	82,303	12,41
12X18H10T	10,50	17,8	1,34	0,35	0,080	0,03	0,008	–	0,5	–	69,398	24,60
03X20H16AG6	15,80	20,4	6,80	–	0,038	–	–	0,24	–	0,002	56,660	36,74

Для испытаний использовали образцы толщиной рабочей части 0,75–2 мм при внутреннем диаметре 18–24 мм. Заготовки после предварительной черновой обработки поверхности подвергали термообработке по режимам, указанным в табл. 2. Финишная операция включала обработку внутренней поверхности твердосплавной разверткой и шлифование наружной поверхности кругом из твердосплавного материала. Опыты проводили при семи соотношениях главных напряжений $K = \sigma_z / \sigma_\theta$: ∞ ; 2; 1; 0,5; 0; –1; $-\infty$.

Т а б л и ц а 2

Режимы термической обработки

Материал	Режим термообработки
07X16H6	Нагрев до 1248 ± 25 К, выдержка 15 мин, закалка, охлаждение до 143 К, выдержка 2 ч, отпуск при 698 К в течение 1 ч
12X18H10T	Без термообработки
03X20H16AG6	Нагрев до 1323 К, выдержка 1 ч, охлаждение в воде

Испытания выполняли при пропорциональном росте напряжений

$$\sigma_z = \frac{N}{\pi[D_0(1 + \varepsilon_\theta) - \delta_0(1 + \varepsilon_r)]\delta_0(1 + \varepsilon_r)} + \frac{\sigma_\theta}{2};$$

$$\sigma_\theta = \frac{p[D_0(1 + \varepsilon_\theta) - 2\delta_0(1 + \varepsilon_r)]}{\delta_0(1 + \varepsilon_r)},$$
(2)

где N , p – осевая сила и внутреннее давление соответственно; D_0 , δ_0 – исходный диаметр и толщина стенки рабочей части образца; ε_θ – тангенциальная деформация; ε_r – радиальная деформация, определяемая из условия упругого изменения объема.

В табл. 3–5 приведены характеристики механических свойств исследуемых материалов при различных напряженных состояниях. Каждая из характеристик определена как среднее значение из полученных при испытаниях не менее трех образцов.

Т а б л и ц а 3

Характеристики механических свойств стали 07X16H6

$T_{\text{исп}}, \text{K}$	K	$\sigma_{0,2}^z,$ МПа	$\sigma_{0,2}^\theta,$ МПа	$\sigma_{\text{в}}^z,$ МПа	$\sigma_{\text{в}}^\theta,$ МПа	$\varepsilon_z,$ %	$\varepsilon_\theta,$ %
293	∞	1170	0	1400	0	11,00	-5,40
	1	1110	1110	1360	1360	4,10	7,90
	0,5	620	1240	680	1360	1,20	4,80
	0	0	1120	0	1360	-4,20	12,90
173	∞	1460	0	1780	0	11,80	-
	1	1370	1370	1570	1570	6,44	6,84
	0,5	660	1320	800	1600	1,42	7,57
	0	0	1350	0	1690	-4,70	13,20
77	∞	1570	0	1890	0	10,63	-4,43
	1	1500	1500	1780	1780	4,80	5,30
	0,5	780	1560	880	1760	1,50	9,00
	0	0	1470	0	1830	-4,10	11,30

Т а б л и ц а 4

Характеристики механических свойств стали 12X18H10T

$T_{\text{исп}}, \text{K}$	K	$\sigma_{0,2}^z,$ МПа	$\sigma_{0,2}^\theta,$ МПа	$\sigma_{\text{в}}^z,$ МПа	$\sigma_{\text{в}}^\theta,$ МПа	$\varepsilon_z,$ %	$\varepsilon_\theta,$ %
1	2	3	4	5	6	7	8
293	∞	380	0	820	0	33,8	-17,0
	1	400	400	780	780	24,8	26,0
	0,5	230	460	380	760	1,6	23,8
	0	0	370	0	780	-17,0	34,0
	-1	-230	230	-	-	-	-
	$-\infty$	390	-	-	-	-	-
173	∞	500	0	1340	0	22,0	-11,2
	1	510	510	1240	1240	17,6	18,0
	0,5	260	520	640	1280	0,7	17,6
	0	0	460	0	1300	-10,2	21,0
	-1	-300	-300	-	-	-	-
	$-\infty$	-510	-	-	-	-	-

1	2	3	4	5	6	7	8
77	∞	680	0	1980	0	20,0	-10,0
	1	650	650	2020	2020	16,4	16,6
	0,5	370	740	1010	2020	0,8	16,3
	0	0	680	0	1980	-9,8	19,8
	-1	-390	390	-	-	-	-
	$-\infty$	-710	-	-	-	-	-

Т а б л и ц а 5

Характеристики механических свойств стали 03X20H16AG6

$T_{\text{исп}}, \text{K}$	K	$\sigma_{0,2}^z,$ МПа	$\sigma_{0,2}^{\theta},$ МПа	$\sigma_{\text{в}}^z,$ МПа	$\sigma_{\text{в}}^{\theta},$ МПа	$\varepsilon_z,$ %	$\varepsilon_{\theta},$ %
293	∞	454,0	0	575,2	0	21,6	-5,0
	2	560,0	280,0	838,0**	419,0**	5,62**	0,09**
	1	470,0	470,0	571,0**	571,0**	0,49**	0,50**
	0,5	270,0	540,0	352,5	705,0	0,11	7,80
	0	0	480,0	0	587,0**	-0,48**	1,04**
	-1	-285,0	285,0	-587,0*	587,0*	0,50*	0,31*
	$-\infty$	-490,0	0	-982,7*	0	-15,21*	789*
173	∞	655,0	0	1069,0	0	18,30	-5,70
	2	750,0	375,0	1228,0	614,0	13,24	0,38
	1	640,0	640,0	755,0**	755,0**	0,68**	0,58**
	0,5	380,0	760,0	460,5**	921,0**	0,11**	-0,53**
	0	0	690,0	0	921,0**	0,13**	0,46**
	-1	-385,0	385,0	-475,2*	475,2*	1,61*	1,86*
	$-\infty$	-720,0	0	-800,0	0	-1,04**	0,4*
77	∞	1030,0	0	1502,0	0	21,4	-8,9
	2	1170,0	585,0	1626,0	813,0	0,59	10,91
	1	1050,0	1050,0	1173,0**	1173,0**	0,48**	0,53**
	0,5	590,0	1180,0	643,5**	1287,0**	0,11**	1,24**
	0	0	1130,0	0	1290,0	-0,80	1,68
	-1	-630,0	630,0	-722,0*	722,0*	-1,2*	1,08*
	$-\infty$	-1045,0	0	-1100,0*	0	-1,29*	0,46*

Примечание. Одной звездочкой отмечены значения, соответствующие моменту потери устойчивости образца при испытании, двумя – значения, соответствующие появлению “свища” в стенке образца.

На рис. 1 в качестве примера показаны начальные участки кривых деформирования стали 12Х18Н10Т при шести соотношениях главных напряжений. Общие закономерности деформирования при понижении температуры металла у других сталей остаются такими же, что и у стали 12Х18Н10Т.

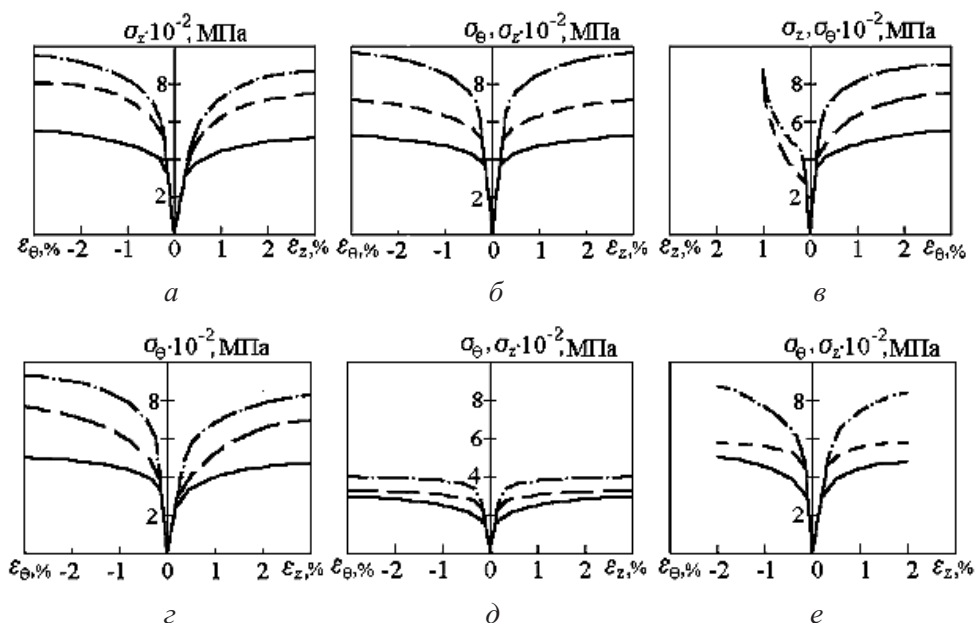


Рис. 1. Кривые деформирования стали 12Х18Н10Т в условиях плоского напряженного состояния при температурах 293 К (сплошные линии), 173 К (штриховые линии), 77 К (штрих-пунктирные линии) и различных соотношениях главных напряжений : а – $K = \infty$; б – $K = 1$; в – $K = 0,5$; г – $K = 0$; д – $K = -1$; е – $K = -\infty$.

Следует отметить, что все стали после соответствующей термообработки обладают изотропией свойств: кривые растяжения в осевом и тангенциальном направлениях и кривые при двухосном равномерном растяжении практически совпадают.

Анализ кривых деформирования показывает, что температура испытаний и вид напряженного состояния оказывают существенное влияние на механические свойства легированных сталей. С понижением температуры для всех материалов характерно увеличение сопротивления деформированию и разрушению при всех соотношениях главных напряжений. Вид напряженного состояния заметно влияет как на деформационную способность сталей, так и на характеристики прочности. Так, если в условиях одноосного растяжения пластичность всех трех сталей слабо зависит от температуры, то при двухосном растяжении эта зависимость становится существенней, интенсивное уменьшение пластичности наблюдается у сталей с более низким никелевым эквивалентом.

При понижении температуры происходит заметное увеличение характеристик прочности, причем темп роста предела прочности выше, чем предела текучести. В результате, как это следует из рис. 2, отношение условного предела текучести к пределу прочности с понижением температуры для сталей с более высоким никелевым эквивалентом имеет тенденцию к уменьшению, в

том числе и при двухосном растяжении. Это свидетельствует о том, что ресурс пластичности легированных сталей с понижением температуры, по крайней мере при одноосном растяжении, не уменьшается. Однако более высокое расположение кривых $\sigma_{0,2}/\sigma_B = f(T, K)$ при двухосном растяжении (на рис. 2 штриховые линии) указывает на принципиальную возможность хрупкого разрушения некоторых хромоникелевых сталей при жестких напряженных состояниях, например при трехосном растяжении в зонах с высокой концентрацией напряжений. Этим, очевидно, можно объяснить случаи исчерпания пластичности не только при нормальной, но и при низких температурах в местах, где при достаточно высоких уровнях компонент тензора напряжений реализуется жесткое напряженное состояние. Кроме того, вид напряженного состояния может влиять на кинетику мартенситных превращений в некоторых сталях [6], которые интенсифицируются при низких температурах и приводят к снижению пластичности металла.

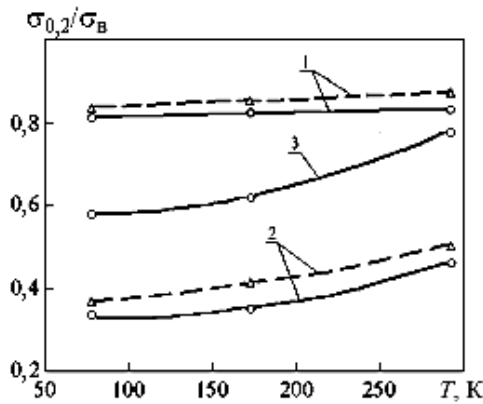


Рис. 2. Влияние температуры на зависимость отношения $\sigma_{0,2}/\sigma_B$ для сталей 07X16H6 (1), 12X18H10T (2) и 03X20H16AG6 (3) в условиях одноосного растяжения (сплошные линии) и равномерного двухосного растяжения (штриховые линии).

Для большинства легированных сталей широкое экспериментальное подтверждение при комнатной температуре получила гипотеза единой кривой деформирования, которая положена в основу деформационной теории пластичности. Однако базы экспериментальных данных для этих сталей при низких температурах крайне ограничены. В связи с этим представляется принципиально важной проверка инвариантности к виду напряженного состояния для исследованных сталей кривых $\sigma_i(\varepsilon_i)$ и $\tau_{\max}(\gamma_{\max})$, полученных при деформировании в условиях низких температур (σ_i , ε_i — интенсивность напряжений и деформаций; τ_{\max} , γ_{\max} — максимальные касательные напряжения и сдвиги) — рис. 3. Достаточно плотная группировка экспериментальных точек, полученных при разных соотношениях главных напряжений, около кривых при одноосном растяжении свидетельствует о возможности использования при построении определяющих уравнений, описывающих низкотемпературное упругопластическое деформирование при произвольной системе напряжений сталей 12X18H10T и 03X20H16AG6, кривых $\sigma_i(\varepsilon_i)$, а стали 07X16H6 — кривой $\tau_{\max}(\gamma_{\max})$.

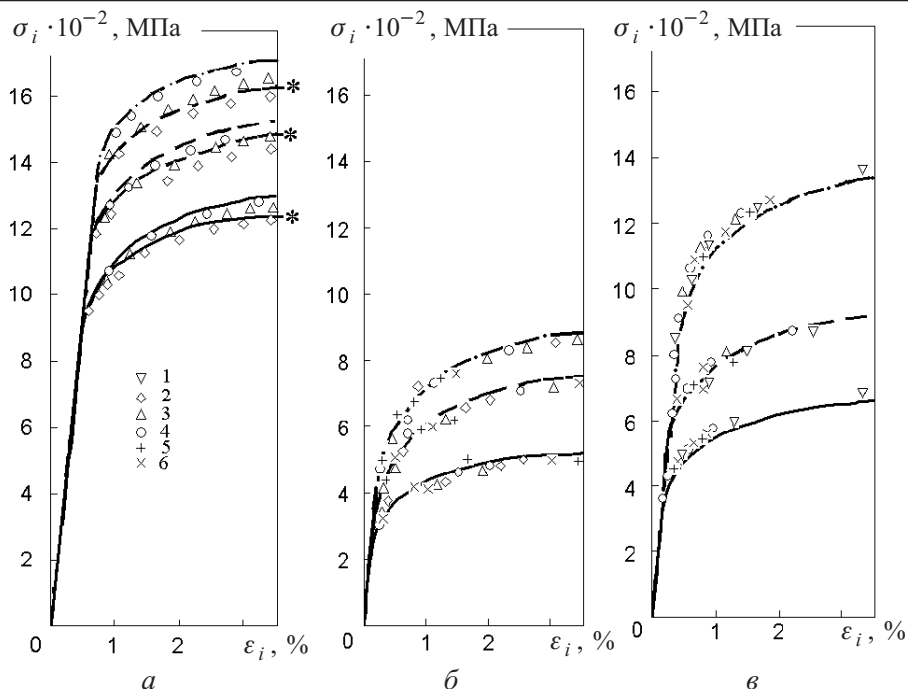


Рис. 3. Обобщенные кривые деформирования легированных сталей 07X16H6 (а), 12X18H10T (б) и 03X20H16AG6 (в) в условиях плоского напряженного состояния при 293 К (сплошные линии), 173 К (штриховые линии) и 77 К (штрихпунктирные линии): 1 – $K = 2$; 2 – $K = 1$; 3 – $K = 0,5$; 4 – $K = 0$; 5 – $K = -1$; 6 – $K = -\infty$. (Звездочкой отмечены кривые $\tau_{\max} - \gamma_{\max}$.)

На рис. 4,а–в приведены предельные диаграммы Треска и Мизеса, построенные по средним значениям текучести сталей при одноосном растяжении. Там же нанесены экспериментальные точки, соответствующие предельным состояниям текучести при разных соотношениях главных напряжений. Видно, что в исследованном температурном диапазоне предельное состояние сталей 12X18H10T ($Ni_{\text{экв}} = 24,60\%$) и 03X20H16AG6 ($Ni_{\text{экв}} = 36,74\%$) описывается условием Мизеса, а стали 07X16H6, имеющей сравнительно низкий никелевый эквивалент ($Ni_{\text{экв}} = 12,41\%$), – условием Треска, что соответствует результатам, представленным на рис. 3,а.

Таким образом, понижение температуры не приводит к качественно новым закономерностям механического поведения легированных сталей. При охлаждении вплоть до температуры жидкого азота не происходит охрупчивания сталей и заметного увеличения отклонений от указанных предельных кривых; снижение температуры сопровождается ростом сопротивления сталей деформированию в соответствии с изотропным расширением предельных кривых без нарушения структуры условий текучести.

Представляет интерес сопоставление описанных выше экспериментальных данных с результатами испытаний нелегированных сталей в аналогичных условиях. На рис. 4,г приведены предельные кривые текучести среднеуглеродистой стали (0,37% С), начало текучести которой при комнатной температуре хорошо описывается условием Мизеса. С понижением температуры наблюдается неизотропное расширение предельной поверхности: в

области двухосного растяжения относительное сопротивление материала уменьшается, в области одноосного – увеличивается. Экспериментальные точки, соответствующие двухосному растяжению при низких температурах, лежат внутри эллипса Мизеса, при чистом сдвиге – снаружи. С понижением температуры сопротивление стали одноосному сжатию увеличивается более интенсивно, чем сопротивление одноосному растяжению, что характерно для малопластичных материалов.

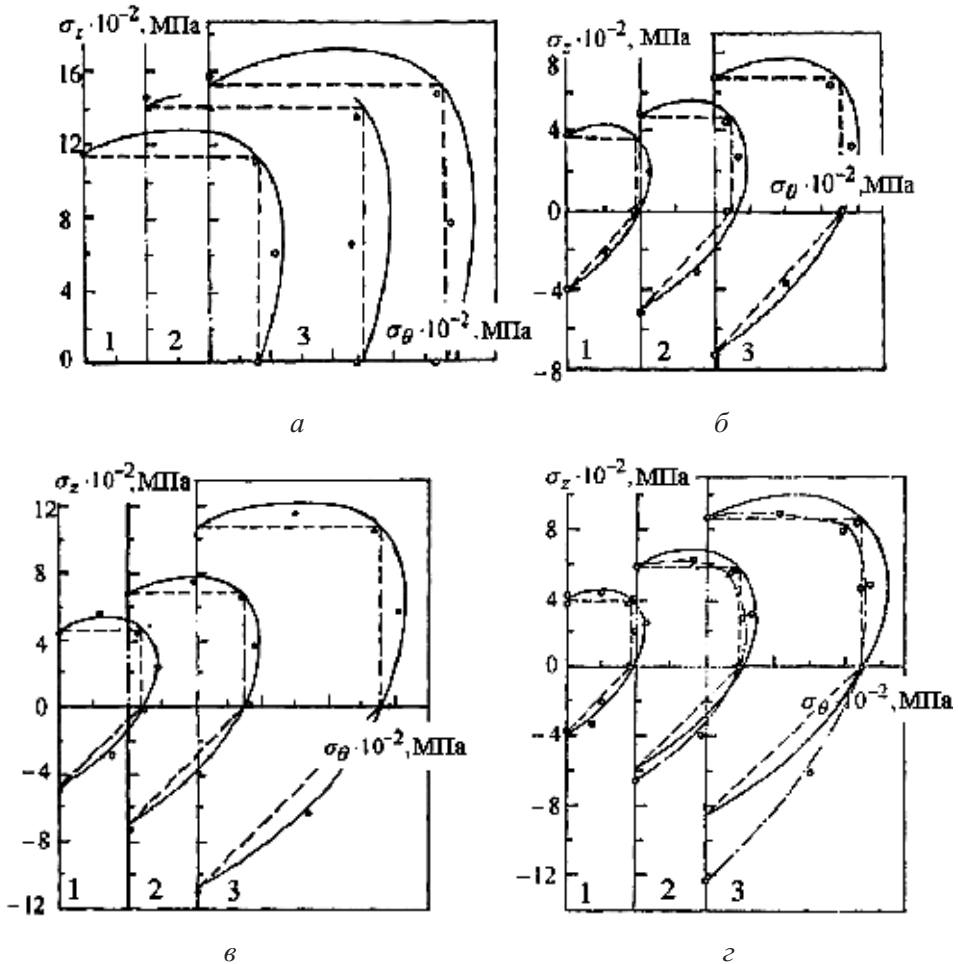


Рис. 4. Предельные диаграммы текучести легированных сталей 07X16N6 (а), 12X18N10T (б); 03X20N16AG6 (в) и среднеуглеродистой стали (0,37% С) (г) в условиях плоского напряженного состояния: 1 – $T = 293$ К; 2 – $T = 173$ К; 3 – $T = 77$ К. (Сплошные линии – по условию Мизеса, штриховые линии – по условию Кулона, штрихпунктирные линии – по условию (3).)

Отмеченные особенности влияния низких температур на закономерности изменения размеров и формы предельной поверхности углеродистой стали связаны, очевидно, с влиянием температуры на механизмы пластической деформации и разрушения углеродистой стали, а именно: с повышением концентрации напряжений на границах зерен и образованием микро- и макротрещин.

Таким образом, сопротивление деформированию охлажденной стали следует рассматривать с учетом статистических аспектов структурных трансформаций металла, приводящих к накоплению повреждений. Это указывает на необходимость оценивать прочность стали с учетом статистических закономерностей, физическому и феноменологическому анализу которых посвящены многие работы.

В частности, в работе [1] обоснован критерий предельного состояния структурно-неоднородных материалов в виде

$$\eta_{\Sigma} = \chi\sigma_i + (1 - \chi)\sigma_1 A^{1-I}, \quad (3)$$

где σ_i , σ_1 – интенсивность напряжений и максимальное нормальное напряжение, отражающие влияние актов сдвига и отрыва соответственно на сопротивление материала деформированию; χ – параметр пластичности материала, $\chi = \sigma_B^p / \sigma_B^c = 0 \dots 1,0$; A – характеристика структуры, $A = 0,5 \dots 1,0$; I – жесткость напряженного состояния, $I = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) / \sigma_i$.

Для пластичных материалов при комнатной температуре ($\chi = 1$) критерий (3) совпадает с критерием Мизеса. При понижении температуры многие материалы, в том числе углеродистые стали, охрупчиваются вплоть до полной потери пластичности ($\chi = 0$). Такая гибкость критерия (3) предопределяет хорошее качественное и количественное его соответствие расположению экспериментальных точек и предельных кривых, построенных для сталей при нормальной и низких температурах (рис. 4,з). В нашем случае в критерии (3) принято $A = 0,75$ – среднее из возможных для реальных материалов значение.

Приведенные выше сведения об особенностях влияния охлаждения на свойства легированных и углеродистых сталей при сложном напряженном состоянии свидетельствуют об актуальности исследований по рациональному наполнению банка экспериментальных данных о закономерностях деформирования конструкционных материалов разных классов при низких температурах в зависимости от вида напряженного состояния. Это позволяет повысить точность мониторинга несущей способности многих изделий криогенной техники, а также машин и сооружений, эксплуатирующихся при низких температурах.

Резюме

Наведено результати експериментальних досліджень закономірностей низькотемпературного деформування деяких легованих конструкційних сталей при плоскому напруженому стані, що імітує умови роботи матеріалу в трубно-оболонкових конструкціях. Експериментальну частину досліджень виконано при навантаженні тонкостінних трубчатих зразків осьювою силою (розтяг, стиск) і внутрішнім тиском, у тому числі за низьких температур.

1. Писаренко Г. С., Лебедев А. А. Деформирование и прочность материалов при сложном напряженном состоянии. – Киев: Наук. думка, 1976. – 416 с.

2. ДСТУ 2550-94. Методы механических испытаний при сложном напряженном состоянии в условиях кратковременного и длительного нагружения. – Киев: Госстандарт Украины, 1994. – 24 с.
3. А.с. 300806 СССР, МКИ С01 3/18 № 1058226/25-28. Установка для испытания материалов на трубчатых образцах при низких температурах / А. А. Лебедев, В. П. Ламашевский. – Оpubл. 07.04.71. Бюл. № 3.
4. Лебедев А. А., Ковальчук Б. И., Ламашевский В. П. и др. Методы измерения деформаций при механических испытаниях в условиях сложного напряженного состояния // Метрология. – 1975. – № 12. – С. 14 – 19.
5. Лебедев А. А., Билан В. Н., Гришко В. Г. и др. Системы автоматического управления экспериментом при исследовании механических свойств материалов в условиях сложного напряженного состояния // Пробл. прочности. – 1977. – № 5. – С. 109 – 112.
6. Lebedev A. A., Kosarchuk V. V., Gudramovych V. S. Micro- and macrostructural aspects of plastic deformation of metastable steels // Solids Mechanics and Its Applications / Eds. O. T. Bruhns, E. Stein. – Dordrecht; Boston; London: Kluwer Academic Publishers, 1998. – vol. 62. – P. 355 – 362.

Поступила 02. 07. 2009