

О выборе допускаемых напряжений при расчетах на прочность конструкций криогенной техники

В. А. Стрижало, Л. С. Новогрудский

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

Рассмотрены разработанные в Институте проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины методы определения допускаемых напряжений для элементов конструкций, которые эксплуатируются при криогенных температурах. Методы позволяют учитывать влияние низкотемпературного упрочнения и разупрочняющего электромагнитного воздействия на величину допускаемых напряжений.

Ключевые слова: допускаемые напряжения, криогенная температура, низкотемпературное упрочнение, импульсы электрического тока.

Введение. Под механической прочностью какой-либо детали либо конструктивного элемента понимается их способность сопротивляться воздействию различных факторов, сохраняя при этом целостность и работоспособность. Сохранение целостности и работоспособности конструкции определяется ее предельным состоянием и зависит от напряженно-деформированного состояния ее элементов, уровня и характера нагрузок, среды и т.д. В зависимости от вида предельного состояния конструкции (по несущей способности, по развитию чрезмерных деформаций, по образованию или раскрытию трещин) выбирается тот или иной критерий предельного состояния. В качестве критериев могут быть выбраны максимальные нагрузки, приводящие к разрушению либо появлению остаточных деформаций, остаточные деформации, возникновение трещин, время или число циклов до разрушения и т.д. Наступление предельного состояния указывает на то, что дальнейшая эксплуатация данного элемента конструкции невозможна. Как отмечалось в работе [1], "... такой подход не полностью совпадает с общепринятым, когда прочность лимитируется разрушением детали. Если нам известно предельное состояние исследуемого объекта и выбран критерий, представляющий собой величину, характеризующую достижение предельного состояния, – усилие, напряжение, температура, время, размер (изменение длины или толщины) изношенного слоя или длина трещины, то этот критерий должен быть принят за предельную величину и по нему должно быть выбрано допускаемое значение этой величины с определенным запасом прочности, который будет зависеть от степени точности оценки параметра, принятого за критерий предельного состояния”.

Для ряда конструкций, эксплуатирующихся при низких и криогенных температурах, наступление предельного состояния может характеризоваться появлением остаточных деформаций, зарождением трещин. Соответственно критериями его наступления в этих случаях будут: равенство расчетных эквивалентных напряжений в опасной зоне конструкции напряжениям начала пластического течения материала ($\sigma_{\text{эКВ}} = \sigma_{\text{T}}$) или пределу прочности

($\sigma_{\text{ЭКВ}} = \sigma_{\text{В}}$) и достижение значением коэффициента интенсивности напряжений критического значения ($K_{\text{I}} = K_{\text{Ic}}$).

Таким образом, руководствуясь подходом [1], рассчитать несущие элементы конструкций криогенной техники по предельному состоянию можно с использованием значений характеристик прочности или разрушения материала при рабочей температуре, установив их допускаемое значение.

Учет низкотемпературного упрочнения материалов. Как правило, при прочностных расчетах конструкций криогенного назначения используют значения характеристик материалов, определенные при комнатной температуре. При таком подходе способность металлических материалов повышать прочность с понижением температуры используется как естественный запас прочности, что при существующих эффективных методах оценки напряженно-деформированного состояния конструкций является технически и экономически нецелесообразным. Например, по данным работы [2] фактический запас прочности изделий, изготовленных из холодопластичных материалов при криогенных температурах, может в 5–12 раз превышать выбранное при температуре 293 К значение. Степень влияния охлаждения от 293 до 4,2 К на механические характеристики сталей и сплавов криогенного назначения представлена в безразмерных величинах в табл. 1 [3, 4]. Как следует из приведенных данных, рост характеристик прочности при понижении температуры зависит от класса материала. Тем не менее само явление низкотемпературного упрочнения (НТУ) имеет место для всех металлических материалов, при этом значительная их часть сохраняет высокие значения и пластичности и вязкости разрушения.

Т а б л и ц а 1

Влияние низкой температуры на изменение механических характеристик конструкционных сплавов

Сплав	T, K	$k_{\sigma_{\text{В}}}, \%$	$k_{\sigma_{0,2}}, \%$	$k_{\delta}, \%$	$k_{K_{\text{Ic}}}, \%$	$\sigma_{0,2}/\sigma_{\text{В}}$
1	2	3	4	5	6	7
ВТ1-0	293	–	–	–	–	0,700
	77	112,5	80,5	46,0	–	0,600
	4,2	144,5	121,7	–6,2	–	0,640
ВТ5-1	293	–	–	–	–	0,920
	77	66,7	74,9	8,3	–	0,970
	4,2	81,5	93,8	–73,8	–	0,985
АТ2-2	293	–	–	–	–	0,950
	77	52,4	56,0	–4,5	–	0,970
	4,2	71,3	71,8	–32,3	–	1,000
ВТ6С	293	–	–	–	–	0,940
	77	56,2	58,7	0	–	0,950
	4,2	60,5	70,8	–52,8	–	1,000
1201 (Д20-1)	293	–	–	–	–	0,650
	77	32,2	24,3	0	–	0,655
	4,2	57,2	32,6	62,8	–	0,550

1	2	3	4	5	6	7
АМг6	293	–	–	–	–	0,42
	77	40,4	–2,3	45,9	53,7	0,29
	4,2	74,3	2,3	–13,9	–47,3	0,25
АМг5	293	–	–	–	–	0,42
	77	45,2	22,9	51,8	25,8	0,35
	4,2	90,7	44,2	44,5	–8,1	0,31
АМцС	293	–	–	–	–	0,63
	77	118,9	43,1	41,7	4,7	0,41
	4,2	251,0	70,8	3,2	–2,9	0,35
12Х18Н10Т	293	–	–	–	–	0,47
	77	152,7	34,3	–19,2	–11,4	0,25
	4,2	191,5	78,6	–37,4	–52,8	0,29
03Х20Н16АГ6	293	–	–	–	–	0,55
	77	96,8	130,0	12,1	–7,1	0,64
	4,2	137,5	181,3	–13,5	–66,3	0,66
03Х13АГ19	293	–	–	–	–	0,39
	77	52,7	121,9	–37,8	–46,7	0,57
	4,2	66,8	161,8	–21,4	–	0,62
03Х13Н9Г19АМ2	293	–	–	–	–	0,61
	77	116,0	137,3	–30,6	–	0,67
	4,2	165,5	204,7	–51,5	–	0,69
БрХ08	293	–	–	–	–	0,64
	77	64,5	5,4	29,4	–	0,41
	4,2	102,5	20,3	61,6	–	0,38

Примечание. $k_{\sigma_B} = \frac{\sigma_B^T - \sigma_B^{293\text{ К}}}{\sigma_B^{293\text{ К}}} \cdot 100\%$; $k_{\sigma_{0,2}} = \frac{\sigma_{0,2}^T - \sigma_{0,2}^{293\text{ К}}}{\sigma_{0,2}^{293\text{ К}}} \cdot 100\%$; $k_{\delta} = \frac{\delta^T - \delta^{293\text{ К}}}{\delta^{293\text{ К}}} \cdot 100\%$;

$$k_{K_{lc}} = \frac{K_{lc}^T(K_c^T) - K_{lc}^{293\text{ К}}(K_c^{293\text{ К}})}{K_{lc}^{293\text{ К}}(K_c^{293\text{ К}})} \cdot 100\%.$$

Очевидно, что обоснованное использование НТУ с целью снижения запаса прочности при проектировании конструкций, эксплуатирующихся в условиях низких и криогенных температур, является весьма перспективным. Особенно эффективно НТУ может быть реализовано в изделиях, у которых максимальные уровни номинальных механических напряжений достигаются при стабильно низкой температуре. Примером таких изделий могут служить металлоемкие сверхпроводящие электромагнитные системы электрофизических и энергетических устройств и установок, масса металлических конструкций которых достигает 1000 т. Положительный эффект может быть получен за счет уменьшения габаритов отдельных элементов системы, вследствие чего уменьшается расстояние между магнитными устройствами, что приводит к повышению электромагнитного взаимодействия и возможности снижения металлоемкости конструктивных элементов и соответственно расхода дорогостоящего гелия.

Использование НТУ позволяет решать, казалось бы, неразрешимые в настоящее время технические проблемы. Например, условия работы несущих элементов сверхпроводящих электромагнитных систем реактора управляемого термоядерного синтеза таковы, что значения эквивалентных напряжений, вычисленные от суммарного действия всех видов нагрузок, в 1,5...2,8 раза превышают значения пределов текучести современных холодопластичных сплавов при температуре 293 К. Снизить уровень напряжений за счет изменения размеров конструктивных элементов не представляется возможным ввиду особенностей физического построения таких устройств, обуславливающего существование определенного оптимума между размерами их конструктивных элементов и величиной создаваемого электромагнитного поля. Решение данной проблемы возможно, если уровни опасных напряжений устанавливать на основании значений механических характеристик сплавов, определенных при температуре эксплуатации 4,2 К.

Проблемы использования НТУ всесторонне рассмотрены в работах [3–10]. Подходы к его применению для повышения уровня допускаемых напряжений $[\sigma] = \sigma_0 / n$ (σ_0 – опасное напряжение, характеризующее наступление предельного состояния металла; n – коэффициент запаса прочности) можно разделить на две группы. Согласно подходам первой группы, значение опасного напряжения для пластичных при температуре эксплуатации материалов принимается равным пределу прочности при этой температуре [11–13]. Однако данная концепция недостаточно экспериментально обоснована для изделий криогенной техники. Это связано с тем, что расхождение между прочностью материала, определяемой при испытаниях лабораторных образцов, и его прочностью в конструкции при равных значениях коэффициента запаса возрастает с понижением температуры испытаний в несколько раз (рис. 1) [8]. Использование такого подхода также опасно для систем с высоким запасом упругой энергии или при вероятности неконтролируемого роста нагрузки. Нарушение служебных функций и даже разрушение систем может произойти по достижении рабочими напряжениями уровня напряжений начала прерывистого течения, характерного для температур < 30 К [5].

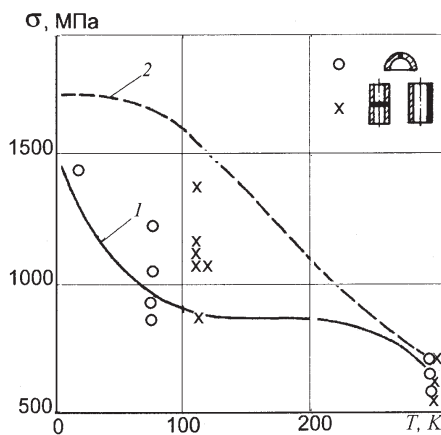


Рис. 1. Температурная зависимость прочности стали 12X18H10T: 1 – полусферы (диаметр 315 мм, толщина стенки $h = 1,3$ мм) и трубы (диаметр 42 мм, $h = 1,5$ мм); 2 – стандартные образцы, испытанные на растяжение.

Второй подход, который практически реализован в нормативных документах [14, 15], позволяет учитывать низкотемпературное упрочнение при определении допускаемых напряжений в виде поправки на упрочнение $[\Delta\sigma]$. При этом сама поправка определяется для несварных элементов как меньшее из значений

$$[\Delta\sigma] = \left[\frac{\Delta\sigma_B}{n_B} \beta'; \frac{\Delta\sigma_{0,2}}{n_T} \beta'; \frac{\Delta\sigma_B}{n_B} q'; \frac{\Delta\sigma_{0,2}}{n_T} q' \right]. \quad (1)$$

Здесь $\Delta\sigma_B$ и $\Delta\sigma_{0,2}$ – абсолютные приросты пределов прочности и текучести при понижении температуры, $\Delta\sigma_B = \sigma_B - \sigma_B^{293K}$, $\Delta\sigma_{0,2} = \sigma_{0,2} - \sigma_{0,2}^{293K}$; q' и β' – параметры, характеризующие изменение удельной энергоёмкости материала при понижении температуры,

$$q' = \frac{E\varepsilon_B(\sigma_{0,2} + \sigma_B)(\sigma_B^{293K})^2}{E^{293K}\varepsilon_B^{293K}(\sigma_{0,2}^{293K} + \sigma_B^{293K})\sigma_B^2};$$

$$\beta' = \frac{E\varepsilon_B(\sigma_{0,2} + \sigma_B)(\sigma_{0,2}^{293K})^2}{E^{293K}\varepsilon_B^{293K}(\sigma_{0,2}^{293K} + \sigma_B^{293K})\sigma_{0,2}^2},$$

где E , ε_B , $\sigma_{0,2}$, σ_B – значения механических характеристик при низкой температуре; E^{293K} , ε_B^{293K} , $\sigma_{0,2}^{293K}$, σ_B^{293K} – то же при комнатной температуре.

Дальнейшее развитие этот подход получил в работе [16], в которой поправки на деформационное $[\Delta\sigma_1]$ и низкотемпературное $[\Delta\sigma_2]$ упрочнение предложено учитывать отдельно, а их сумму прибавлять к величине допускаемого напряжения $[\sigma]$, определяемого при комнатной температуре:

$$[\Delta\sigma] = [\Delta\sigma_1] + [\Delta\sigma_2];$$

$$[\Delta\sigma_1] = \frac{(\sigma_B - \sigma_{0,2})\beta_1}{2n_T/(n_T) - 1};$$

$$[\Delta\sigma_2] = \frac{(\sigma_{0,2} - [\sigma_T])\beta_2}{n_T},$$

где

$$\beta_1 = \frac{(\sigma_B - \sigma_{0,2})\varepsilon_B}{2\sigma_{0,2}}; \quad \beta_2 = \frac{\varepsilon_B(\sigma_{0,2} - [\sigma_T])}{2\sigma_{0,2}}.$$

Допускаемые напряжения в сварных элементах конструкций определяют с помощью статистического подхода, позволяющего учитывать влияние конст-

руктивно-технологических факторов на низкотемпературное упрочнение на основании экспериментальных данных, полученных при испытаниях лабораторных образцов. Температурную зависимость конструкционной прочности, в том числе и сварных изделий, в этом случае устанавливают с использованием корреляционного соотношения ξ [2]. Допускаемые напряжения при реализации такой методики для низкотемпературных условий определяют как меньшее из значений

$$[\sigma]_{\text{св}} = \left\{ \left([\sigma] + \frac{\Delta\sigma_{\text{в}}}{n_{\text{в}}} \xi^2 K \right) \varphi; \left([\sigma] + \frac{\Delta\sigma_{0,2}}{n_{0,2}} \xi^2 K \right) \varphi \right\},$$

где ξ^2 – квадрат корреляционного соотношения; φ – коэффициент прочности сварного шва при температуре 293 К; K – поправочный коэффициент к расчету прочности сварного шва при криогенной температуре.

В развитие концепции, реализуемой в работах [10, 14–16], с целью учета неопределенности, связанной со скачкообразным развитием деформации при температурах ниже 30 К, параметры энергопоглощения (β'') предлагается вычислять по нижней огибающей диаграммы прерывистого течения [17].

Следовательно, при расчетах на прочность тонкостенных криогенных конструкций, работающих в условиях глубокого охлаждения, низкотемпературное упрочнение учитывают путем введения соответствующих поправок на значения допускаемых напряжений, определяемых по характеристикам прочности материала при комнатной температуре.

Согласно временным нормам расчета на прочность силовых элементов магнитных систем термоядерного реактора, разработанным сотрудниками ИМАШ РАН, Института проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, НИИ “Электрофизической аппаратуры”, Института электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины [18], величины допускаемых напряжений предлагается вычислять по значениям характеристик материалов, определяемых при расчетной температуре. Однако в связи с недостаточным опытом эксплуатации таких уникальных изделий предполагается использовать только часть НТУ в соответствии со следующим выражением:

$$[\sigma] = \min \left\{ \frac{\sigma_{\text{в}} K_{\text{в}}}{n_{\text{в}}}; \frac{\sigma_{0,2} K_{0,2}}{n_{0,2}} \right\},$$

где $n_{\text{в}} = 2$; $n_{0,2} = 1,5$; $\sigma_{\text{в}}$ и $\sigma_{0,2}$ – пределы прочности и текучести при криогенной температуре; $K_{\text{в}}$ и $K_{0,2}$ – коэффициенты, учитывающие влияние низкой температуры.

Значения $K_{\text{в}}$ и $K_{0,2}$ приближенно определяются как

$$K_{\text{в}} = \frac{0,8\sigma_{\text{в}}^{293\text{К}} + 0,2\sigma_{\text{в}}}{\sigma_{\text{в}}}; \quad K_{0,2} = \frac{0,8\sigma_{0,2}^{293\text{К}} + 0,2\sigma_{0,2}}{\sigma_{0,2}}.$$

Для повышения точности расчетов можно использовать большую часть НТУ, вводя в расчетные зависимости значения характеристик трещиностойкости. Тогда коэффициенты K_B и $K_{0,2}$ вычисляются следующим образом:

$$K_B = \frac{\sigma_B^{293K}}{\sigma_B} \left(1 - \frac{K_{Ic}}{K_{Ic}^{293K}} \right) + \frac{K_{Ic}}{K_{Ic}^{293K}};$$

$$K_{0,2} = \frac{\sigma_{0,2}^{293K}}{\sigma_{0,2}} \left(1 - \frac{K_{Ic}}{K_{Ic}^{293K}} \right) + \frac{K_{Ic}}{K_{Ic}^{293K}},$$

где $\sigma_{0,2}$, σ_B , K_{Ic} – характеристики прочности и вязкости разрушения при криогенной температуре; $\sigma_{0,2}^{293K}$, σ_B^{293K} , K_{Ic}^{293K} – то же при комнатной температуре.

В работе [19] для эффективного использования НТУ в условиях глубокого охлаждения предлагается уровни допускаемых напряжений рассчитывать по значениям механических характеристик, определяемым при расчетной температуре. При этом для пластичных при низких температурах материалов предлагается в расчете учитывать значения пределов текучести и прочности:

$$[\sigma] = \min \left\{ \frac{\sigma_{0,2}}{n_{0,2}}; \frac{\sigma_B}{n_B} \right\},$$

а для материалов, склонных к охрупчиванию, – только значения пределов текучести:

$$[\sigma] = \frac{\sigma_{0,2}}{n_{0,2}},$$

где $\sigma_{0,2}$ и σ_B – характеристики прочности при расчетной температуре; $n_{0,2} = 1,5$; $n_B = 2$.

Концепция базируется на использовании в качестве опасных напряжений – напряжений начала макропластического течения, что исключает возможность проявления в материале конструкций эффектов прерывистой текучести.

Выделим пять схем учета НТУ при выборе уровня допускаемых напряжений, записать которые можно следующим образом (в качестве опасного напряжения выбрано значение условного предела текучести при низкой $\sigma_{0,2}$ или комнатной $\sigma_{0,2}^{293K}$ температуре):

схема № 1. $[\sigma] = \frac{\sigma_{0,2}}{n}$ [11–13, 19];

схема № 2. $[\sigma] = \frac{\sigma_{0,2}^{293K}}{n} + \frac{\Delta\sigma}{n} \beta'$ [14, 15];

схема № 3. $[\sigma] = \frac{\sigma_{0,2}^{293K}}{n} + \frac{\Delta\sigma}{n} \beta''$ [17];

схема № 4. $[\sigma] = \frac{\sigma_{0,2}^{293\text{K}}}{n} K_{0,2}$ [18];

схема № 5. $[\sigma] = \frac{\sigma_{0,2}^{293\text{K}}}{n} + \frac{\Delta\sigma_1}{n} \beta_1 + \frac{\Delta\sigma_2}{n} \beta_2$ [16].

На рис. 2 представлены данные, из которых следует, что при выборе допускаемых напряжений для стали 03Х20Н16АГ6 из пяти рассмотренных схем наиболее консервативной при температуре 4,2 К является схема № 3.

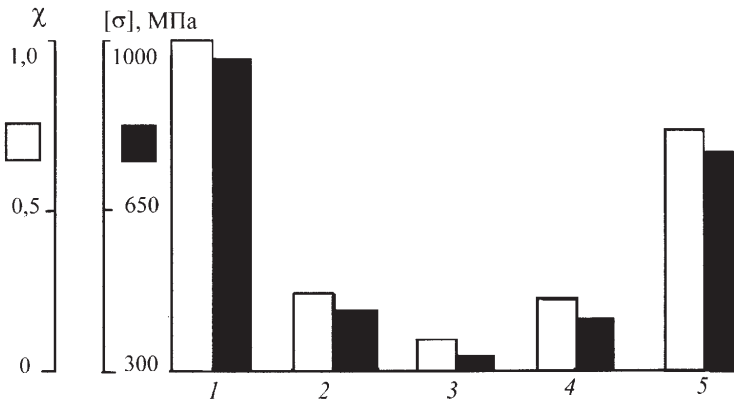


Рис. 2. Значения допускаемых напряжений (темные столбцы) и степень использования НТУ (светлые столбцы), вычисленные для стали 03Х20Н16АГ6 с использованием различных схем:

1, 2, 3, 4, 5 – схемы № 1, 2, 3, 4, 5 соответственно; $\chi = \frac{[\sigma] - [\sigma_{0,2}^{293\text{K}}]}{(\sigma_{0,2} - \sigma_{0,2}^{293\text{K}}) / n}$.

В качестве расчетных параметров, отражающих НТУ материала, в соотношениях (1)–(5) использовались значения пределов прочности и текучести, относительного равномерного удлинения, энергии деформирования, вычисляемой в случае прерывистого течения как по верхней, так и по нижней огибающей диаграммы деформирования, а также характеристик трещиностойкости. Результаты сравнения этих значений, определенных при комнатной температуре и температуре жидкого гелия для широко применяемых в криогенной технике сталей и алюминиевых сплавов, приведены в табл. 2 [20]. В качестве характеристики прерывистого течения в табл. 2 используется число скачков нагрузки n . Требования к определению механических характеристик металлических материалов при криогенных температурах нормируются действующим на территории Украины ГОСТ 22.706-77 “Металлы. Метод испытаний на растяжение при температурах от -100 до -269°C ”. Положения этого нормативного документа не регламентируют выбор целого ряда принципиальных параметров, таких, например, как жесткость испытательного оборудования или режим нагружения. Используемые для оценки НТУ сталей и сплавов значения характеристик прочности, пластичности и трещиностойкости определены в соответствии с положениями указанного стандарта и ГОСТ 25.506-85 “Методы механических испытаний материалов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении”. Тем не менее идентичный уровень НТУ для сталей и

Т а б л и ц а 2

Параметры низкотемпературного упрочнения конструкционных материалов

Материал	Размеры образца, мм	$\frac{\sigma_{0,2}^{4,2\text{K}}}{\sigma_{0,2}^{293\text{K}}}$	$\frac{\sigma_{\text{B}}^{4,2\text{K}}}{\sigma_{\text{B}}^{293\text{K}}}$	$\frac{\delta^{4,2\text{K}}}{\delta^{293\text{K}}}$	$\eta = \frac{W^{4,2\text{K}}}{W^{293\text{K}}}$		n	$\frac{J_c^{4,2\text{K}}}{J_c^{293\text{K}}}$
					η'	η''		
АМг5	$s_0 = 12$	1,17	1,32	0,44	1,37	1,35	235	0,77*
	$d_0 = 4$	1,44 (1,45)	1,90 (1,50)	1,46 (1,30)	3,91 (2,72)	3,69	93	
АМг6	$s_0 = 12$	1,32	1,51	0,70	1,33	1,22	203	0,25*
	$d_0 = 4$	1,02 (1,03)	1,74 (1,59)	0,86 (0,80)	1,53 (1,31)	1,50	74	
АМцС	$s_0 = 10$	1,60	3,17	1,01	4,74	4,48	272	0,86*
	$d_0 = 4$	1,70 (1,66)	3,10 (2,73)	1,03 (1,02)	5,43 (4,22)	5,31	103	
03Х20Н16АГ6	$s_0 = 9$	3,33	2,03	0,49	1,13	1,06	34	0,30*
	$d_0 = 4$	4,09 (4,07)	2,22 (1,76)	0,68 (0,43)	2,35 (0,98)	2,00	22 (1)	
ОН9	$s_0 = 10$	1,47	1,74	0,90	1,44 (0,22)	1,22	21	0,30**
	$d_0 = 4$	1,68 (1,68)	1,80 (1,50)	0,78 (0,34)	1,81 (1,10)	1,61	14 (1)	
12Х18Н10Т	$d_0 = 4$	2,71 (2,71)	2,55 (2,15)	0,85 (0,74)	3,76 (2,31)	3,38	49 (11)	0,21*

Примечания: 1. Одной звездочкой отмечены значения $J_{\text{Ic}}^{293\text{K}}$, двумя – $J_{\text{Ic}}^{4,2\text{K}}$, вычисленные по $K_{\text{Ic}}^{4,2\text{K}}$. 2. $W^{293\text{K}}$, $W^{4,2\text{K}}$ – полная энергия разрушения образцов при температурах 293 и 4,2 К соответственно. 3. η' , η'' – отношение энергий при вычислении $W^{4,2\text{K}}$ по верхней и нижней огибающей диаграммы деформирования соответственно. 4. В скобках приведены значения характеристики при запасе упругой энергии системы, значительно превышающей энергоемкость образца. 5. s_0 – начальная толщина плоского образца; d_0 – начальный диаметр цилиндрического образца. 6. n – число скачков нагрузки.

алюминиевых сплавов криогенного назначения при варьировании размерами, режимами нагружения и жесткостью испытательного оборудования в пределах, не противоречащих требованиям ГОСТов, не был получен (табл. 2). Значения параметров НТУ при увеличении объема деформируемого металла уменьшаются практически для всех рассматриваемых сталей и сплавов. Наиболее существенно уменьшаются энергетические параметры НТУ, например, для стали 03Х20Н16АГ6 и сплава АМг5 (более чем в два раза). В меньшей степени уменьшение параметров отмечается для сплавов, прерывистое течение которых характеризуется малой амплитудой скачка и высокой вязкостью разрушения. К ним относится сплав АМцС, у которого амплитуда скачков напряжения для обоих видов образцов не превышает 1% текущего значения напряжения. В результате повышения запаса упругой энергии системы сило-

нагрузки испытательной установки характеристики НТУ изменяются еще значительнее. Неизменными при этом остаются лишь значения пределов текучести материалов. Следует отметить, что в условиях монотонного протекания процесса деформирования при температуре 77 К изменение размеров и формы образцов несущественно (в пределах 5%) влияет на значения параметров НТУ [20].

Представленные результаты свидетельствуют о том, что уровень НТУ сталей и сплавов, определяемый кинетикой процесса прерывистого течения, значительно зависит от факторов, которые необходимо отнести к аппаратурным и масштабным. Фактически при определении параметров НТУ по результатам испытаний лабораторных образцов осуществляется лишь субъективная (присущая данному образцу и полученная на конкретном оборудовании при конкретном режиме) оценка их значений. Поэтому прогнозировать конструкционную прочность реального изделия криогенного назначения на основании испытаний образцов необходимо весьма осторожно.

Выбор допускаемых напряжений с учетом НТУ при действии импульсов электрического тока. Как показано выше, особенно эффективное использование НТУ отмечается для устройств, подверженных действию номинальных и максимальных нагрузок при низкой (криогенной) температуре. К таким устройствам относятся и сверхпроводящие электромагнитные системы, существенные размеры которых, например, у реализованного в настоящее время ускорителя элементарных частиц достигают десятков километров, а массы – тысяч тонн. В переходных, пусковых и аварийных режимах работы в несущих элементах таких устройств могут индуцироваться импульсы электрического тока. Ранее [5, 21–23] показано, что прохождение импульсов электрического тока через нагруженный металл при криогенных температурах может стимулировать пластическое течение при напряжении, значительно меньшем его предела текучести при данной температуре (рис. 3), т.е. материал в таких условиях находится под упрочняющим влиянием низкой температуры и разупрочняющим – импульсов электрического тока (ИЭТ).

В принятых в энергетическом машиностроении нормах расчета предельное состояние материала оценивают по кратковременному разрушению (вязкому и хрупкому), разрушению в условиях ползучести при статических нагрузках, предельно допускаемой величине пластической деформации и т.д.

В первом случае в качестве предельных (опасных) характеристик выбирают предел прочности (для хрупкого состояния) или предел текучести (для вязкого состояния) материала:

$$\sigma_y \leq [\sigma] = \left[\frac{\sigma_B}{n_B}; \frac{\sigma_T}{n_T} \right]. \quad (2)$$

Для конструкций, эксплуатирующихся при температурах, близких к 4,2 К, представляется целесообразным в расчетных схемах в качестве характеристики предельного состояния использовать те, значения которых не зависят от эффектов прерывистой текучести [5]. Поэтому для материалов, напряжение начала прерывистого течения которых превышает предел текучести, опасные напряжения необходимо устанавливать по значениям последних, в противном

случае – по напряжению начала прерывистого течения либо по напряжению начала пластического течения, инициированного каким-либо воздействующим фактором. К таковому следует отнести и действие импульсов электрического тока. В этом случае в качестве предельного (опасного $\sigma_{\text{ТОК}}^0$) необходимо рассматривать напряжение начала пластического течения, инициированного импульсом электрического тока. Тогда по аналогии с (2) можно записать

$$\sigma_{\text{э}}^{\text{ТОК}} \leq [\sigma^{\text{ТОК}}] = \frac{\sigma_{\text{ТОК}}^0}{n_{\text{T}}} \quad (3)$$

Величина опасного напряжения при действии ИЭТ произвольной формы описывается соотношением [5]

$$\sigma_{\text{ТОК}}^0 = \sqrt{2E \left(\int_0^{0,2} \sigma d\varepsilon - \lambda \rho \int_0^{\tau} j^2(t) dt \right)}, \quad (4)$$

где E – модуль упругости; λ – коэффициент, определяемый экспериментально; j – плотность тока в импульсе; τ – длительность импульса; ρ – удельное электрическое сопротивление материала.

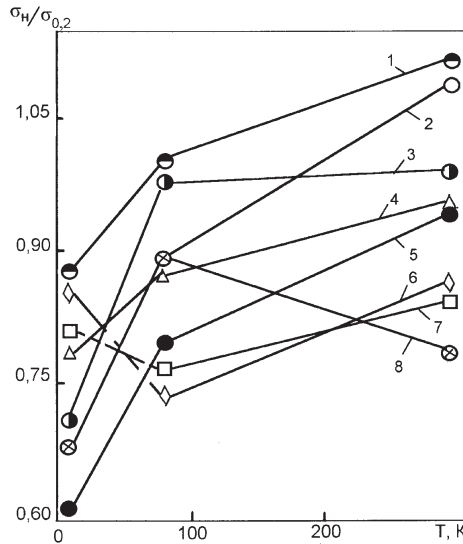


Рис. 3. Влияние охлаждения до температуры 4,2 К на значение напряжения начала пластического течения материалов $\sigma_{\text{н}}/\sigma_{0,2}$, инициированного импульсом электрического тока ($J = 229 \text{ MA/M}^2$, $\tau = 10^{-2} \text{ с}$): 1 – сталь 03X13AG19; 2 – сталь 12X18H10T; 3 – сталь 0H9; 4 – сталь 03X19AG3H10; 5 – сталь 03X20H16AG6; 6 – сплав 19; 7 – сплав ПТЗВ; 8 – сплав 3М.

При использовании выражения (4) для определения опасных при действии ИЭТ напряжений НТУ материала будет учитываться, если параметры, характеризующие материал (E , ρ) и уровень его нагруженности (σ , ε), выбраны при низкой температуре, соответствующей температуре эксплуатации изделия.

Таким образом, значение $\sigma_{\text{ТОК}}^0$ будет оптимизировано как по упрочняющему фактору (низкой температуре), так и по разупрочняющему (действию ИЭТ), а условие прочности (3) примет вид

$$\sigma_{\text{э}}^{\text{ТОК}} \leq [\sigma^{\text{ТОК}}] = \frac{1}{n_{\text{т}}} \sqrt{2E \left(\int_0^{0,2} \sigma d\varepsilon - \lambda \rho \int_0^{\tau} j^2(t) dt \right)}.$$

Проанализируем подробно величины допускаемых напряжений, рассчитанные с помощью описанных выше известных подходов к их выбору при воздействии ИЭТ амплитудой 2,8 кА и длительностью 10^{-2} с, для наиболее перспективной для использования в сверхпроводящих электромагнитных системах стали 03Х20Н16АГ6 при температуре 4,2 К.

Результаты расчета представлены в табл. 3 для поковки, значения характеристик прочности которой составляют: $\sigma_{\text{в}}^{293\text{К}} = 780$ МПа; $\sigma_{0,2}^{293\text{К}} = 405$ МПа; $\sigma_{\text{в}}^{4,2\text{К}} = 1820$ МПа; $\sigma_{0,2}^{4,2\text{К}} = 1440$ МПа. Расчет допускаемых напряжений выполнен по пределу текучести. При действии ИЭТ в качестве опасного выбрано напряжение начала пластического течения $\sigma_{\text{ТОК}}^0$, равное 875 МПа для стали 03Х20Н16АГ6 при температуре 4,2 К [5].

Т а б л и ц а 3

Значения допускаемых напряжений, рассчитанные по различным методикам, для стали 03Х20Н16АГ6

№ схемы	$[\sigma]$, МПа	$[\sigma^{\text{ТОК}}]$, МПа	$\frac{[\sigma] - [\sigma^{293\text{К}}]}{(\sigma_{0,2} - \sigma_{0,2}^{293\text{К}})/n}$	$\frac{[\sigma^{\text{ТОК}}] - [\sigma^{293\text{К}}]}{(\sigma_{0,2} - \sigma_{0,2}^{293\text{К}})/n}$
1. $[\sigma] = \frac{\sigma_{0,2}^{4,2\text{К}}}{n}$	960	583	1,00	0,45
2. $[\sigma] = \frac{\sigma_{0,2}^{293\text{К}}}{n} + \frac{\Delta\sigma}{n} \beta'$	421	338	0,22	0,10
3. $[\sigma] = \frac{\sigma_{0,2}^{293\text{К}}}{n} + \frac{\Delta\sigma}{n} \beta^*$	320	289	0,07	0,04
4. $[\sigma] = \frac{\sigma_{0,2}^{4,2\text{К}} K_{0,2}}{n}$	408	323	0,19	0,08
5. $[\sigma] = \frac{\sigma_{0,2}^{293\text{К}}}{n} + \frac{\Delta\sigma_1}{n} \beta_1 + \frac{\Delta\sigma_2}{n} \beta_2$	770	420	0,72	0,21

Следует отметить, что данная сталь по сравнению с другими, используемыми в криогенной технике, характеризуется достаточно устойчивой стабильностью аустенита при понижении температуры, оптимальным сочетанием значений различных механических характеристик, а также наибольшим НТУ при действии ИЭТ, которое по предельным характеристикам может быть оценено как $\sigma_{\text{ТОК}}^0 / \sigma_{0,2}^{293\text{К}} = 2,16$.

Из представленных в табл. 3 данных видно, что даже в случае полного использования НТУ [11–13, 19] величина допускаемых напряжений при действии ИЭТ меньше, например, значения эквивалентного напряжения $\sigma_3 = 740$ МПа, определенного при расчете напряженно-деформированного состояния сверхпроводящей электромагнитной системы (СЭМС) термоядерного реактора ИТЕР [19]. При применении энергетических методов определения допускаемых напряжений значения $[\sigma]$ даже при отсутствии воздействия ИЭТ меньше σ_3 . Поскольку в силу физических особенностей работы реактора ИТЕР значения σ_3 уменьшить нельзя, необходимо уточнить величины допускаемых напряжений при действии ИЭТ $[\sigma_{\text{ток}}]$.

Удовлетворительный результат можно получить при выполнении определенных требований к условиям работы материала в конструкции СЭМС, которые заключаются в недопущении при максимальных эксплуатационных нагрузках пластической деформации металла. При этом суммарные напряжения не должны превышать напряжения начала пластического течения, вызванного действием ИЭТ при рабочей температуре. Величину допускаемых напряжений при расчете на прочность конкретных стальных элементов конструкций СЭМС, подвергаемых в процессе работы действию ИЭТ, можно определить следующим образом:

$$[\sigma^{\text{ток}}] = [\sigma_{0,2}^{293\text{K}}] + \Delta\sigma^{\text{ток}}, \quad (5)$$

где

$$\Delta\sigma^{\text{ток}} = \sigma_{\text{ток}}^0 - \sigma_{0,2}^{293\text{K}}, \quad (6)$$

$\sigma_{\text{ток}}^0$ – значение опасных напряжений при действии ИЭТ и расчетной температуре (4).

При таком подходе полностью используется НТУ, реализуемое при действии ИЭТ, и в то же время обеспечивается условие прочности: для стали 03Х20Н16АГ6 при температуре 4,2 К получим $[\sigma^{\text{ток}}] = 740$ МПа, т.е. $\sigma_3 = [\sigma^{\text{ток}}]$.

В рассматриваемом случае коэффициент запаса прочности $n = \sigma_{\text{ток}}^0 / [\sigma^{\text{ток}}]$ составляет 1,2, что ниже рекомендуемых [19] значений, равных 1,3. Уменьшение коэффициента запаса прочности для криогенных конструкций весьма опасно, поскольку реализованная прочность материала меньше, полученной при испытаниях на растяжение гладких образцов (рис. 1). Однако даже при эксплуатационных перегрузках для конструкции, рассчитанной с использованием данного подхода, условия безопасной эксплуатации нарушаться не будут, так как в особых случаях допускается превышение величин эквивалентных напряжений допускаемых в 1,4...1,8 раза* [18].

Анализ данных, представленных на рис. 4, показывает, что такой подход при действии ИЭТ позволяет максимально использовать ресурс материала, связанный с низкотемпературным упрочнением. Значения допускаемых напря-

* При этом нарушается условие (3). При расчетах на прочность конструкций подобного типа разрешить противоречие можно, выбрав материал, у которого $\sigma_{\text{ток}}^0 \geq (1,4...1,8)\sigma_3 n$.

жений для ряда сталей и титановых сплавов, вычисленные по уравнению (5) и приведенные в табл. 4, свидетельствуют о том, что при предлагаемом подходе низкотемпературное упрочнение используется при

$$\frac{\sigma_{0,2}^{293\text{K}}}{n} < [\sigma^{\text{ТОК}}] \leq \frac{\sigma_{0,2}^{4,2\text{K}}}{n}. \quad (7)$$

Рассмотрим условия выполнения неравенства (7). С учетом выражений (5) и (6) запишем

$$\frac{\sigma_{0,2}^{293\text{K}}}{n} < \frac{\sigma_{0,2}^{293\text{K}}}{n} + (\sigma_{\text{ТОК}}^0 - \sigma_{0,2}^{293\text{K}}),$$

откуда следует, что

$$\sigma_{0,2}^{293\text{K}} < \sigma_{\text{ТОК}}^0.$$

Таким образом, значение напряжения начала пластического течения материала при действии ИЭТ и расчетной температуре должно превышать значение предела текучести при комнатной температуре, а в предельном случае их равенства ($\sigma_{0,2}^{293\text{K}} = \sigma_{\text{ТОК}}^0$) величина допускаемых напряжений определяется как $[\sigma^{\text{ТОК}}] = [\sigma_{0,2}^{293\text{K}}]$ – низкотемпературное упрочнение не используется.

Т а б л и ц а 4

Значения допускаемых напряжений сталей и титановых сплавов, рассчитанные по уравнению (5)

Материал	$\Delta\sigma^{\text{ТОК}}$, МПа	$[\sigma^{\text{ТОК}}]$, МПа	$\frac{[\sigma^{\text{ТОК}}] - [\sigma_{0,2}^{293\text{K}}]}{(\sigma_{0,2}^{4,2\text{K}} - \sigma_{0,2}^{293\text{K}})/n}$	$\frac{\sigma_{0,2}^{4,2\text{K}}}{n} / [\sigma^{\text{ТОК}}]$
	1	2	3	4
Стали				
12X18H10T	240	430	0,73	1,20
03X20H16AG6	470	740	0,78	1,29
03X19AG3H10	395	672	0,97	1,01
0H9	150	636	0,45	1,44
03X13AG19	375	598	1,18	0,90
Титановые сплавы				
ПТЗВ	167	572	0,71	1,12
ЗМ	32	424	0,15	1,43
19	350	826	1,06	0,97

Аналогично проанализируем правую часть неравенства (7):

$$\frac{\sigma_{0,2}^{293\text{K}}}{n} + (\sigma_{\text{ТОК}}^0 - \sigma_{0,2}^{293\text{K}}) \leq \frac{\sigma_{0,2}^{4,2\text{K}}}{n}.$$

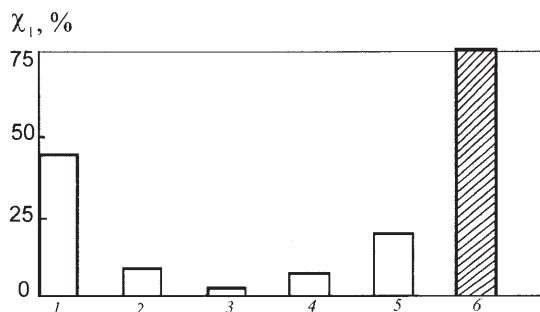


Рис. 4. Использование НТУ при вычислении $[\sigma^{\text{ток}}]$ стали 03X20H16AG6 при температуре 4,2 К:

1–5 – № схемы (табл. 3); 6 – $[\sigma^{\text{ток}}] = [\sigma^{293\text{K}}] + \Delta\sigma^{\text{ток}}$; $\chi_1 = \frac{[\sigma^{\text{ток}}] - [\sigma^{293\text{K}}]}{(\sigma_{0,2} - \sigma_{0,2}^{293\text{K}})/n}$.

После преобразования данного соотношения получим следующее выражение:

$$n(\sigma_{\text{ток}}^0 - \sigma_{0,2}^{293\text{K}}) \leq \sigma_{0,2}^{4,2\text{K}} - \sigma_{0,2}^{293\text{K}}. \quad (8)$$

С учетом условия (6), обозначив $(\sigma_{0,2}^{4,2\text{K}} - \sigma_{0,2}^{293\text{K}})$ как $\Delta\sigma^{4,2\text{K}}$, неравенство (8) запишем в виде

$$n\Delta\sigma^{\text{ток}} \leq \Delta\sigma^{4,2\text{K}}. \quad (9)$$

Выражение (9) показывает, что при действии ИЭТ максимальное значение НТУ, которое может быть использовано при определении допускаемых напряжений, регламентируется коэффициентом запаса прочности и должно составлять не более $1/n$ части НТУ материала в исходном состоянии. Нарушение этого условия, а именно: $n\Delta\sigma^{\text{ток}} > \Delta\sigma^{4,2\text{K}}$, свидетельствует о том, что требования к нормированной величине коэффициента запаса по наступлению предельного состояния материала при расчетной температуре не удовлетворяются. При этом значение НТУ, учитываемое при расчете $[\sigma^{\text{ток}}]$, превышает допустимое (коэффициент низкотемпературного упрочнения больше единицы), а допускаемые напряжения выше, чем значения, определенные для материала в исходном состоянии при 100%-ном учете НТУ (коэффициент запаса меньше единицы). Например, для стали 03X13AG19 и титанового сплава 19 условие (9) не выполняется, что подтверждается данными для этих материалов, представленными в столбцах 3 и 4 табл. 4.

Таким образом, рассмотренные схемы использования НТУ для повышения уровня допускаемых напряжений при расчетах на прочность конструктивных элементов криогенного оборудования основываются на различных принципах, однако позволяют в каждом конкретном случае достаточно обоснованно выбирать повышенные (по сравнению с расчетом без учета НТУ) уровни допускаемых напряжений. При расчетах на прочность несущих узлов оборудования, подвергаемых в процессе эксплуатации действию ИЭТ, допускаемые напряжения необходимо выбирать с учетом изменения величин опасных напряжений, вызванных таким воздействием.

Резюме

Розглянуто розроблені в Інституті проблем міцності ім. Г. С. Писаренка НАН України методи визначення допустимих напружень для елементів конструкцій, що працюють за криогенних температур. Методи дозволяють враховувати вплив як низькотемпературного зміцнення, так і знеміцнюючої електромагнітної дії на величину допустимих напружень.

1. Писаренко Г. С. О механической прочности материалов и элементов конструкций // Пробл. прочности. – 1984. – № 1. – С. 3 – 5.
2. Novikov N. V., Ul'yanenko A. P., and Gorodyskii N. I. Consideration of thermal strengthening in calculating allowable stresses // Strength Mater. – 1980. – **12**, No. 3. – P. 277 – 281.
3. Pisarenko G. S., Strizhalo V. A., Znachkovskii O. Ya., and Novogrudskii L. S. Effect of deep cooling on crack resistance and low-temperature hardening of aluminum alloys // Strength Mater. – 1984. – **16**, No. 11. – P. 1528 – 1534.
4. Стрижало В. А., Филин Н. В., Куранов Б. А. и др. Прочность материалов и конструкций при криогенных температурах. – Киев: Наук. думка, 1988. – 200 с.
5. Стрижало В. А., Новогрудский Л. С., Воробьев Е. В. Прочность материалов при криогенных температурах с учетом воздействия электромагнитных полей. – Киев: Ин-т пробл. прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, 2008. – 504 с.
6. 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.
7. Писаренко Г. С., Стрижало В. А. Влияние глубокого охлаждения на особенности деформирования конструкционных сплавов и выбор допускаемых напряжений // Прочность материалов и конструкций при низких температурах. – Киев: Наук. думка, 1990. – С. 3 – 9.
8. Новиков Н. В., Майстренко А. Л., Ульяненко А. П. Конструкционная прочность при низких температурах. – Киев: Наук. думка, 1979. – 232 с.
9. Новиков Н. В., Филин Н. В., Городынский Н. И. и др. Прочность материалов и конструкций криогенной техники. – Киев: Наук. думка, 1992. – 280 с.
10. Чечин Э. В. Прочность и металлоемкость оболочечных конструкций при криогенных температурах. – Киев: Ин-т пробл. прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, 2008. – 184 с.
11. РТМ 56-60. Сосуды и аппараты. Методы расчета на прочность элементов и узлов из пластичных в условиях эксплуатации металлов. – Введ. 01.10.69.
12. Mitchell N. Mechanical and Electrical Design Criteria for the ITER Magnets. – ITER-IL-MG-1-8-3, 1990. – 45 p.

13. *Superconducting Coils and Structures Division. Design Criteria and Data Base. Table of Constants.* – R 1.01.94-06-30WD. – 1995. – No. 11. – 23 p.
14. *ОСТ 26-04-2585-86.* Техника криогенная и криогенновакуумная. Сосуды и камеры. Нормы и методы расчета на прочность, устойчивость и долговечность конструкций. – Введ. 01.07.86.
15. *Kuranov B. A., Lebedev A. A., Novikov N. V., and Strizhalo V. A.* Standards for the stress analysis of thin-walled shell structures in cryogenic engineering // *Strength Mater.* – 1983. – **15**, No. 1. – P. 121 – 126.
16. *Чечин Э. В.* Расчет конструкций на прочность с учетом ресурсов пластичности и упрочняемости материалов // *Пробл. машиностроения и надежности машин.* – 1999. – № 2. – С. 41 – 52.
17. *Vorob'ev E. V. and Strizhalo V. A.* Standardization of the strength of metals under the conditions of low-temperature instability of plastic deformation and the action of strong magnetic fields // *Strength Mater.* – 1999. – **31**, No. 5. – P. 459 – 466.
18. *Махутов Н. А., Алымов В. Т., Бугаенко С. Е. и др.* Проект временных норм расчета на прочность СЭМС ИТЭР // Тез. докл. III Всесоюз. конф. “Прочность материалов и конструкций при низких температурах”. – Киев: Ин-т пробл. прочности АН Украины, 1991. – С. 45 – 47.
19. *Стрижало В. А., Спирченко Ю. В., Новогрудский Л. С. и др.* Прочность конструкционных материалов для сверхпроводящих магнитных систем. – Киев, 1990. – 21 с. – (Препр. / АН УССР. Ин-т пробл. прочности).
20. *Новогрудский Л. С.* Оценка низкотемпературного упрочнения конструкционных материалов при температуре 4,2 К // *Надежность и долговечность машин и сооружений.* – 2006. – Вып. 26. – С. 319 – 325.
21. *Novogradskii L. S.* Ultimate state criteria of structural alloys exposed to the action of electric current pulses: Proc. of 11th Int. Conf. on Fracture. – Turin, 2005. – CD. – Paper 3931.
22. *Стрижало В. А., Новогрудский Л. С., Воробьев Е. В.* Прочность сплавов криогенной техники при электромагнитных воздействиях. – Киев: Наук. думка, 1990. – 155 с.
23. *Стрижало В. А., Новогрудский Л. С.* Оценка предельного состояния конструкционных материалов для сверхпроводящей электромагнитной системы термоядерного реактора // *Вопр. атомной науки и техники.* – 1998. – **67**, вып. 1; **68**, вып. 2. – С. 109 – 111.

Поступила 23. 12. 2009