

РАСЧЁТ ОБОЛОЧКИ АДРОННОГО КАЛОРИМЕТРА КМС1) *Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь*2) *ОАО «АМКОДОР» – управляющая компания холдинга, Минск, Беларусь*

В статье изложены методические требования, которые обязательны при выполнении проектно-сметной документации на изготовление и эксплуатацию разрабатываемых конструкций и сооружений с целью обоснования перехода продукции в товар. Приведен теоретический расчёт конструкции, представляющей собой оболочку, например, корпус судна или цистерну.

Для тестирования деталей адронного калориметра установки КМС нами проведен поисковый теоретический расчёт цилиндрической оболочки, которая образована восемнадцатью деталями, на прочность и началу текучести. Детали (элементы) скреплены таким образом, что образуют цилиндрическую оболочку (кольцо), образующая которого составляет примерно 60 сантиметров. Вдоль образующей действует знакопеременное усилие 280 – 300 кН. Для заданной марки материала сделан проверочный расчёт на прочность при усилии 560 кН [1].

Величина силы при растяжении-сжатии элементов, находится методом теоретического расчёта кольцевой оболочки. Известными являются: диаметр оболочки – 528 сантиметров, вес снаряжённой оболочки – 6000 кН. В расчёте принимаем, что оболочка находится под действием погонной нагрузки по длине кольца (рис. 1.).

Теоретический расчёт на прочность обязателен при выполнении проектно-сметной документации на любую конструкцию, как продукт технического творчества, который должен приобрести статус товара.

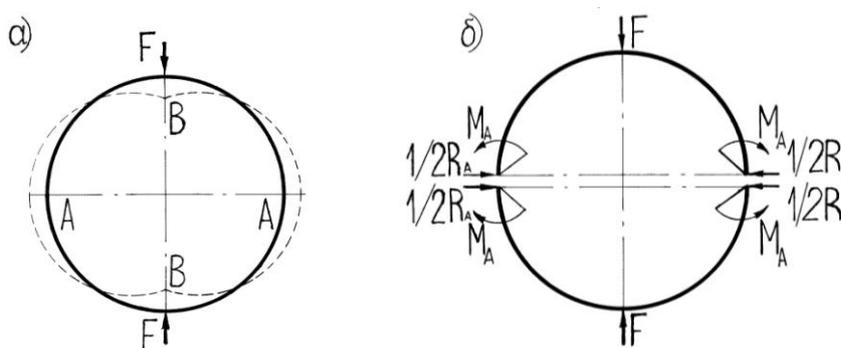


Рис. 1. Деформация поперечного сечения кольца внешними силами F

В технике и теории упругости оболочка – твёрдое тело, ограниченное двумя цилиндрическими поверхностями, расстояние между которыми мало по сравнению с радиусами наружной и внутренней поверхностей [2,3,4]. Толщина стенки имеет величину δ . Поверхность, делящая пополам толщину δ , называется срединной (мембранной) поверхностью.

Под воздействием внешних нагрузок в оболочке возникают внутренние мембранные силы, равномерно распределённые по толщине от усилия изгиба. Благодаря мембранным напряжениям оболочки обладают значительной жёсткостью и сравнительно малым весом [2], что отличает их от пластинок и стержневых систем.

Если напряжения находятся в пропорциональной зависимости для материала оболочки, то метод расчёта основывается на зависимостях теории упругости. Для тонкостенных оболочек используют теорию Кирхгофа – Лява [2,3], согласно которой любое прямое волокно оболочки, нормально расположенное к мембранной поверхности до деформации, остаётся прямым и нормальным к ней после деформации без изменения длины. Под действием силы F в вертикальном и горизонтальном сечениях в направлениях их диаметров происходят деформации перемещения.

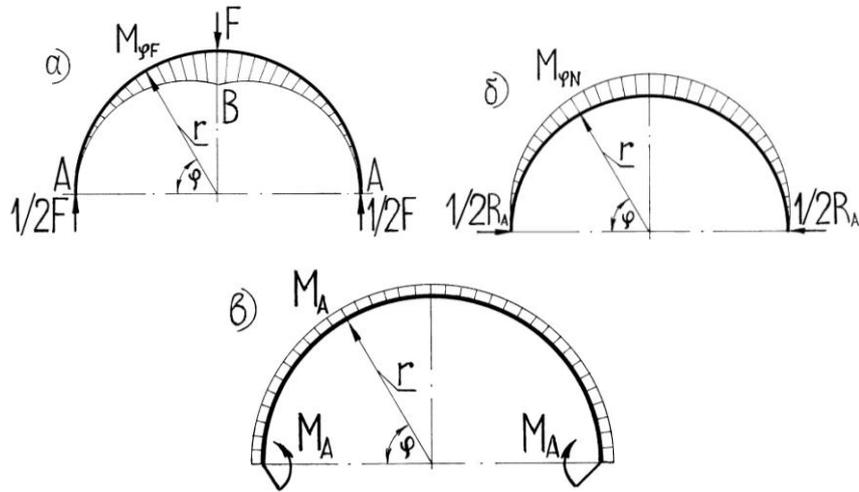


Рис. 2. Эпюры изгибающих моментов от воздействия силы F

Если отсутствует ограничение перемещения по направлению горизонтального диаметра, то изгибающий момент M_A неизвестен, а при ограничении перемещений неизвестной будет реакция $R_A/2$ упоров.

Из начальных условий, сечения $A - A$ не поворачиваются при деформации кольца и перемещения в них не происходят, определяем момент M_A и реакцию R_A .

Так как оболочка симметрична относительно горизонтального диаметра, то для построения, необходимых в расчёте эпюр, условно отбрасываем нижнюю половину оболочки (рис. 2. а). Наносим на основной расчётной схеме все силы, в том числе заменяем отброшенную часть оболочки силами $F/2$.

Изгибающие моменты в основной схеме в сечении под углом φ от нагрузки F определится из начальных условий

$$M_{\varphi} = \frac{Fr}{2}(1 - \cos\varphi) - \frac{R_A r}{2} \sin\varphi - M_A \quad (1)$$

и угол поворота сечения $A - A$ от нагрузки F

$$\frac{1}{EI} \int_0^{\pi/2} M_{\varphi} ds = \frac{r}{EI} \int_0^{\pi/2} \left[\frac{Fr}{2}(1 - \cos\varphi) - \frac{R_A r}{2} \sin\varphi - M_A \right] d\varphi = 0, \quad (2)$$

перемещения по направлению реакции R_A будут

$$x_R = \frac{1}{ER_A} \int_0^{\pi/2} M_{\varphi} r \sin\varphi ds = \frac{r^2}{EI} \int_0^{\pi/2} \left[\frac{Er}{2}(1 - \cos\varphi) \sin\varphi - \frac{R_A r}{2} \sin^2\varphi - M_A \sin\varphi \right] d\varphi, \quad (3)$$

где $s = r\varphi$, $ds = r d\varphi$.

На рисунках 2,б и 2,в представлены эпюры изгибающих моментов, соответственно, $M_{\varphi R_A}$ и M_A .

Правильное построение эпюр изгибающих моментов обеспечивает правильное определение прочностных свойств оболочки.

Из анализа зависимости (1) следует, что при $R_A = 0$ (отсутствие ограничения перемещений по горизонтальному диаметру) от действия силы F изгибающие моменты в сечениях оболочки (рис. 3. а) будут

$$M_{\varphi} = (0,318 - 0,5 \cos\varphi) - Fr \quad (4)$$

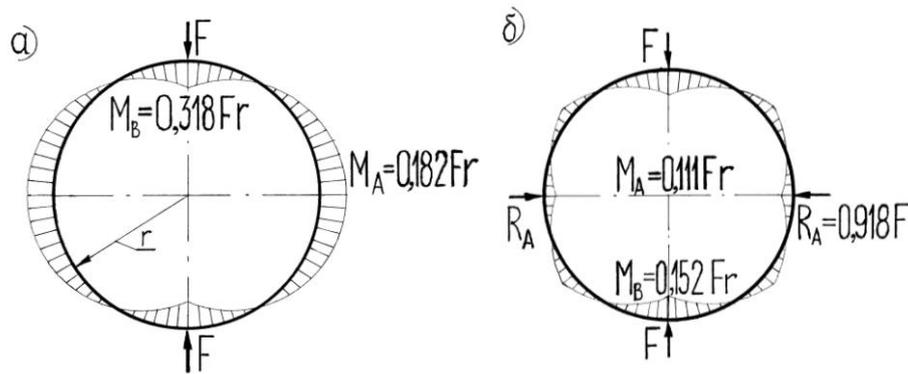


Рис. 3. Величина изгибающих моментов и сил в сечениях В-В и А-А

При условии, что в начальный момент, когда $\varphi = 0$, изгибающий момент в сечении А – А будет равен $M_\varphi = M_A = -0,182 Fr$. Когда $\varphi = 0,5\pi$ в сечении В – В изгибающий момент M_φ будет $M_\varphi = M_B = 0,318 Fr$.

При ограничении перемещений ($R_A \neq 0$) по горизонтальному диаметру реакция упора R_A и изгибающие моменты от силы F (рис. 3. б) будут

$$R_A = 0,918 F; M_\varphi = (0,611 - 0,5 \cos \varphi - 0,459 \sin \varphi) Fr. \quad (5)$$

При условии, что в начальный момент, когда $\varphi = 0$, изгибающий момент будет равен $M_\varphi = M_A = 0,111 Fr$, когда $\varphi = 0,5\pi$, изгибающий момент M_φ будет

$$M_\varphi = M_B = 0,152 Fr.$$

Анализ изложенного и в [2,3] показывает, что уменьшение вертикального и увеличение горизонтального диаметров, когда $R_A = 0$, при возрастании нагрузки F до величины F_T , при котором в крайних волокнах наиболее нагруженного сечения (предел пропорциональности, начало предела текучести), определяются из выражений

$$\Delta D_B = \frac{2 Fr^3}{EI} \int_0^{\pi/2} (0,318 - 0,5 \cos \varphi)(1 - \cos \varphi) d\varphi = 0,149 \frac{Fr^3}{EI}, \quad (6)$$

$$\Delta D_A = \frac{2 Fr^3}{EI} \int_0^{\pi/2} (0,318 - 0,5 \cos \varphi) \sin \varphi d\varphi = 0,137 \frac{Fr^3}{EI}. \quad (7)$$

При ограничении перемещений горизонтального диаметра, когда $x_R = 0$, уменьшение вертикального диаметра при воздействии силы F будет

$$\Delta D_B = \frac{2 Fr^3}{EI} \int_0^{\pi/2} (0,611 - 0,5 \cos \varphi - 0,459 \sin \varphi)(1 - \cos \varphi) d\varphi = 0,0238 \frac{Fr^3}{EI}. \quad (8)$$

Из полученных числовых значений следует, что ограничение перемещений в горизонтальном диаметре резко уменьшаются деформации кольцевых сечений. Изменение вертикального диаметра сосредоточенной силой при ограничении перемещений в горизонтальном направлении уменьшается примерно в шесть раз. Упоры, ограничивающие горизонтальное перемещение, уменьшают распорное усилие оболочки почти до нуля.

При увеличении силы, сжимающей оболочку, после достижения в наиболее нагруженном сечении изгибающего момента, соответствующего началу ползучести в крайних волокнах, начнётся стадия упруго – пластической работы, то есть M_A или M_B будет равно $M_T = \sigma_T W$. В этом случае изменение моментов в сечениях $A - A$ и $B - B$ не будет пропорционально увеличению нагрузки.

Введём некоторые обозначения величин отношением: действительных моментов в сечениях $B - B$ и $A - A$ к моменту начала ползучести через β_B и β_A ($\beta_B = M_B/M_T$; $\beta_A = M_A/M_T$), а отношения условных моментов к моменту M_T через $\gamma_B = M_{\text{вусл}}/M_T$; $\gamma_A = M_{\text{аусл}}/M_T$. Если перемещение в горизонтальном направлении от силы F отсутствует, ползучесть в крайних волокнах будет при $M_B = M_T = \sigma_T W = F_T r/\pi$. В сечении под углом φ отношение моментов будет

$$\beta_\varphi = \pi/2[\beta_{\max}(1 - \cos \varphi) - \beta_A], \quad (9)$$

где $\beta_{\max} = F/F_T$.

Используя условие начальных элементов на границе упругих и упруго-пластических деформаций (рис. 4.) $\beta_\varphi = 1$, получим косинус угла, при котором в крайних волокнах сечения начнётся текучесть, будет

$$\cos \varphi_T = 1 - \frac{2(1 + \beta_A)}{\pi \beta_{\max}}, \text{ а } \varphi_T = \arccos \left[1 - \frac{2(1 + \beta_A)}{\pi \beta_{\max}} \right]. \quad (10)$$

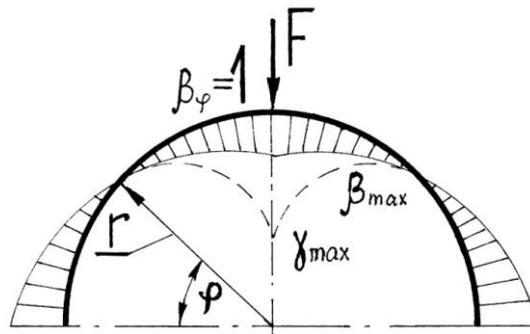


Рис. 4. Эпюра отношений моментов в начале текучести в сечениях от силы F

Для прямоугольных сечений оболочки отношение действительного изгибающего момента к моменту с текучестью в крайних волокнах $M/M_T = \beta$, связаны с соотношением $M_{\text{усл}}/M_T = \gamma$, выражением [2,4]

$$\beta = (1 - \lambda)\gamma + \frac{\lambda}{2} \left(3 - \frac{1}{\gamma^2} \right), \quad (11)$$

где $\lambda = 1 - \frac{E_T}{E}$.

Без учёта нормальных и касательных напряжений в кольцевом сечении, при равенстве нулю угла φ поворота сечения $A - A$ при определении β_{\max} получим выражение

$$\int_0^{\pi/2} \beta_\varphi \alpha \varphi + \int_{\varphi_T}^{\pi/2} (\gamma_\varphi - \beta_A) \alpha \varphi = \int_0^{\pi/2} \beta \alpha \varphi + \lambda \int_{\varphi_T}^{\pi/2} \left[\gamma_\varphi - \frac{1}{2} \left(3 - \frac{1}{\gamma_\varphi^2} \right) \right] \alpha \varphi = 0 \quad (12)$$

При значении β_φ равном (9) выявить зависимость γ_φ от β_φ в явной форме по [2,3,4] практически невозможно.

С увеличением мощности КМС и повторением эксперимента возможно превышение критической величины силы F , тогда механические характеристики прочности оболочки могут перейти в стадию упруго-пластических деформаций. Поэтому необходимо сделать расчёт оболочки в этих условиях.

В случае работы оболочки при относительно больших деформациях, когда $\sigma = \sigma_{02}$, с допустимой погрешностью можно принять зависимость β от γ линейной, при этом модуль упругости упругих деформаций E и упруго-пластических деформаций E_T изменяются по линейному закону в допустимых пределах.

Из рис. 5. видно, что границей упругой работы будет $\beta = \gamma = 3/2$.

Тогда получим

$$\beta_\varphi = \frac{3}{2}\lambda + (1-\lambda)\gamma_\varphi \text{ или } \gamma_\varphi = \frac{2\beta_\varphi - 3\lambda}{2(1-\lambda)} \quad (13)$$

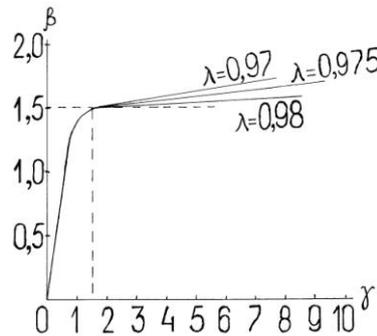


Рис. 5. График зависимости β от γ для прямоугольных сечений (элементы КМС)

Согласно (13) на границе зоны упруго-пластических деформаций отношение моментов будет $\beta_\varphi = 3/2$. Косинус угла φ_T , при котором в сечении начнутся упруго-пластические деформации, будет

$$\cos \varphi_T = 1 - \frac{3 + 2\beta_A}{\pi\beta_{\max}} \text{ и } \varphi_T = \arccos \left(1 - \frac{3 + 2\beta_A}{\pi\beta_{\max}} \right) \quad (14)$$

Для определения изменений диаметров в упруго-пластической стадии необходимо установить зависимость изменения M_A от силы F или β_A от $\beta_{\max} = F / F_T$. Эта зависимость определяется из уравнения, где угол поворота сечения $A - A$ равен нулю

$$\begin{aligned} \int_0^{\pi/2} \beta_\varphi \alpha \varphi + \int_{\varphi_T}^{\pi/2} (\gamma_\varphi - \beta_\varphi) \alpha \varphi &= \int_0^{\pi/2} \beta_A \alpha \varphi + \frac{\lambda}{1-\lambda} \int_{\varphi_T}^{\pi/2} \beta_\varphi \alpha \varphi - \frac{3\lambda}{2(1-\lambda)} \int_0^{\pi/2} \alpha \varphi = \\ &= \int_0^{\pi/2} \left[\frac{\pi}{2} \beta_{\max} (1 - \cos \varphi) - \beta_A \right] \alpha \varphi + \frac{\lambda}{1-\lambda} \left[\int_{\varphi_T}^{\pi/2} \frac{\pi}{2} \beta_{\max} (1 - \cos \varphi) \alpha \varphi - \left(\beta_A + \frac{3}{2} \right) \int_{\varphi_T}^{\pi/2} \alpha \varphi \right] = 0 \end{aligned} \quad (15)$$

Откуда получаем

$$\frac{\pi}{2} \beta_{\max} \left[\left(\frac{\pi}{2} - 1 \right) + \frac{\lambda}{1-\lambda} \left(\frac{\pi}{2} - \varphi_T - 1 + \sin \varphi_T \right) \right] - \beta_A = \frac{-\frac{3\lambda}{2(1-\lambda)} \left(\frac{\pi}{2} - \varphi_T \right)}{\frac{\pi}{2} + \frac{\lambda}{1-\lambda} \left(\frac{\pi}{2} - \varphi_T \right)},$$

где φ_T – в радианах .

Полученная зависимость β_A от β_{max} действительна до значения $\beta_A = 3/2$, так как после следует учитывать упруго-пластические деформации в зоне сечений $A - A$. Уменьшение вертикального диаметра при этом в зоне $B - B$ определяется из уравнения

$$\Delta D_B = \frac{2M_T r^2}{EI} \left\{ \int_{\pi/2}^0 \frac{\pi}{2} \beta_{max} (1 - \cos \varphi)^2 d\varphi - \beta_A \int_{\pi/2}^0 (1 - \cos \varphi) d\varphi + \right. \\ \left. + \frac{\lambda}{1 + \lambda} \left[\int_{\pi/2}^{\varphi_E} \frac{\pi}{2} \beta_{max} (1 - \cos \varphi)^2 d\varphi - \left(\beta_A + \frac{3}{2} \right) \int_{\pi/2}^{\varphi_T} (1 - \cos \varphi) d\varphi \right] \right\} \quad (16)$$

При $M_T = F_T r / \pi$ и $x_T = \frac{F_T r^3}{EI} \frac{\pi^2 - 8}{4\pi}$ после интегрирования получим

$$\Delta D_B = x_T \beta_{max} \frac{4\pi}{\pi^2 - 8} \left\{ \frac{3\pi - 8}{4} - \frac{\beta_A}{\beta_{max}} \left(1 - \frac{2}{\pi} \right) + \right. \\ \left. + \frac{\lambda}{1 - \lambda} \left[\frac{3\pi - 8}{4} - \frac{3}{2} \varphi_T + \sin \varphi_T \left(2 - \frac{\cos \varphi_T}{2} \right) - \frac{2}{\pi \beta_{max}} \left(\beta_A + \frac{3}{2} \right) \left(\frac{\pi}{2} - \varphi_T - 1 + \sin \varphi_T \right) \right] \right\} = \Delta D_B x_T$$

Увеличение горизонтального диаметра получим из выражении

$$\Delta D_A = \frac{2M_T r^2}{EI} \left[\int_0^{\pi/2} \frac{\pi \beta_{max}}{2} (1 - \cos \varphi) \sin \varphi d\varphi + \beta_A \int_0^{\pi/2} \sin \varphi d\varphi + \right. \\ \left. + \frac{\lambda}{1 - \lambda} \int_{\varphi_T}^{\pi/2} \frac{\pi \beta_{max}}{2} (1 - \cos \varphi) \sin \varphi d\varphi - \left(\beta_A + \frac{3}{2} \right) \int_{\varphi_T}^{\pi/2} \sin \varphi d\varphi \right] \quad (17)$$

После интегрирования выражения (17) получим

$$\Delta D_A = x_T \beta_{max} \frac{4\pi}{\pi^2 - 8} \left\{ \frac{1}{2} - \frac{2\beta_A}{\pi \beta_{max}} + \frac{\lambda}{1 - \lambda} \left[\cos \varphi_T \left(1 - \frac{\cos \varphi_T}{2} \right) - \frac{2}{\pi \beta_{max}} \left(\beta_A + \frac{3}{2} \right) \cos \varphi_T \right] \right\} = \Delta D_A x_T$$

Пользуясь зависимостью (15) для цилиндрической оболочки, нагруженной силами F , не ограничивая перемещения по горизонтальному диаметру, найдём значения β_A , которые соответствуют значениям β_{max} . Из зависимостей (16) и (17), после их интегрирования, находим коэффициенты A_B и A_A . Полученные результаты сводим в таблицу 1.

Таблица 1 - Зависимость величин β_A от β_{max} и A_B, A_A от λ при $\lambda = 0,975$

β_{max}	1,50	1,60	1,70	1,80	1,90	2,00	2,05
β_A	0,8562	0,965	1,075	1,695	1,31	1,43	1,5
φ_T, rad	1,5708	1,5499	1,535	1,5239	1,5241	1,5033	1,5025
$\cos \varphi_T$	0,0000	0,0210	0,0357	0,0469	0,0568	0,0679	0,0681
$\sin \varphi_T$	1,0000	0,9998	0,9994	0,9989	0,9984	0,9978	0,9977
Δ_B	1,5	2,04	2,54	3,14	3,62	4,18	4,45
Δ_A	1,37	1,5	1,63	1,76	1,89	2,015	2,87

Если построить график уменьшения (A_B) и увеличения (A_A) диаметров оболочки при работе упруго-пластических деформаций в зоне приложения нагрузки F , когда $x_T = y_T = \frac{M_T r^2}{EI} \frac{\pi^2 - 8}{4\pi} = \frac{\sigma_T r^2}{\delta E} \frac{\pi^2 - 8}{2\pi} = 0,075 \frac{\sigma_T 4r^2}{\delta E}$, где δ – расстояние между наружной и внутренней цилиндрическими поверхностями (толщина стенки кольца), то получим вид кривых, соответствующих рис. 4.

Выводы.

1. В нашей статье речь идёт не столько о новых данных или результатах исследований на основе собственных измерений, сколько об изложении неиспользуемых научно-технических требований механики материалов при проектировании конструкций и сооружений, особенно, при их эксплуатации.

2. Анализ наших расчётных зависимостей и [4] от нагрузки F по длине кольца в стадии ползучести в сечении $A - A$ показывает, что изменение диаметров будет резко возрастать.

3. Из проведенного анализа сделан вывод о том, что деформации в кольцевых сечениях с относительно тонкими стенками, изготовленных элементов из сталей, работающих с упрочнением, могут рассчитываться по закону упругой работы до напряжений $\sigma = 1,5 \sigma_T$. После достижения этих напряжений величина остаточных деформаций в направлениях вертикального и горизонтального диаметров кольца резко увеличивается [5].

ЛИТЕРАТУРА

1. Ларченков Л.В. и др. Тестирование деталей рамной конструкции компактного мюонного соленоида методом неразрушающего контроля. / Л.В. Ларченков, О.Н. Протасеня, И.О. Протасеня. – Мн.: «Наука и Техника». – 2013. - № 3. – С. 6-10.

2. Власов В.З. Общая теория оболочек и её приложения в технике / В.З. Власов. - М.-Л.: Госизд. – 1949. – 784 с.

3. Малинин Н.Н. Расчёты на ползучесть элементов машиностроительных конструкций / Н.Н. Малинин. – М.: Машиностроение. – 1981. – 220 с.

4. Черных К.Ф. Линейная теория оболочек. / К.Ф. Черных. –Л.: ЛГУ. – 1962. – 274 с.

5. Научно-исследовательские работы по изучению упруго-пластических свойств материалов рам адронного калориметра установки CMS: отчёт о НИР (зключ.) БНТУ; рук. Л.В. Ларченков, исполн. Р.В. Стефанович и др. – Минск, 2001. – 45 с.- ГР № 15/11-01.

УДК 620.178.7:669.14

Хмелев А.А., Реут Л.Е., Сидоров В.А.

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА И СОСТОЯНИЯ СТАЛЕЙ ПО ЗНАЧЕНИЮ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАСТИЧНОСТИ В

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Предложен и обоснован метод оценки качества и состояния локально деформированных зон конструкций по значению характеристики пластичности β как отношения ударной вязкости к максимальной твердости зоны. Критерием перехода зоны в хрупкое состояние принято значение $\beta < 0,1$ мм, при котором в реальных конструкциях возникают трещины.

Известна характеристика пластичности β [1] как отношение ударной вязкости стали к ее твердости по Бринеллю, определяемая по формуле:

$$\beta = \frac{a_H}{HB} = \frac{U}{A \cdot HB}, \quad (1)$$