

- Полученные разностные уравнения решаем при времени  $t=0$ , когда деформации ползучести отсутствуют, т. е. в начальный момент времени когда  $\varepsilon_{11}^c = \varepsilon_{22}^c = \varepsilon_{33}^c =_{t=0} = 0$ . Определяем  $u_1$  и  $u_2$ . Затем определяем главные напряжения и главные деформации, возникающие в цилиндре.
- Определяем скорость деформации ползучести

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^c = \frac{3}{2} \frac{\dot{\varepsilon}_u^c}{\sigma_u} S_{kl} \quad (11)$$

где  $S_{kl} = \sigma_{kl} - \delta_{kl}\sigma$  - девиатор напряжений;

$$\delta_{kl} = \begin{cases} 1, & k = l \\ 0, & k \neq l \end{cases} \text{ -- символ Кронекера;}$$

$$\dot{\varepsilon}_u^c = \sqrt{\frac{2}{3} \dot{\varepsilon}_k^c \dot{\varepsilon}_k^c} \text{ - скорость интенсивности деформаций ползучести;}$$

$$\sigma_u = \sqrt{\frac{3}{2} S_{kl} S_{kl}} \text{ - интенсивность напряжений,}$$

закон ползучести  $\dot{\varepsilon}_u^c = f(\sigma_u, T, \tau, t)$  предполагаем известным.

- Используя шаговый метод по времени определяем деформации ползучести на  $n$ -ом шаге

$$\varepsilon_{kl}^c = \varepsilon_{kl}^{c(n-1)} + \dot{\varepsilon}_{kl}^c \cdot \Delta t \quad (12)$$

где  $\varepsilon_{kl}^{c(n-1)}$  - величины деформаций ползучести на предыдущем шаге по времени;

$\dot{\varepsilon}_{kl}^c$  - величины скоростей деформации ползучести в момент времени  $t_{n-1}$ ;

$\Delta t$  - шаг по времени.

$k, l=1, 2, 3$ .

- Полученные деформации ползучести подставляем в исходное уравнение равновесия и в граничные условия. Решаем заново систему уравнений (9-10) с учетом деформаций ползучести полученных на прошлом шаге по времени и т. д.

Данный алгоритм решения позволяет производить расчеты напряженно-деформированного состояния полых цилиндров при значительных объемных изменениях, вызванных неравномерным нагревом и нейтронным облучением с учетом тепловой и радиационной ползучести.

Алгоритм также можно использовать при расчете конструкций другой формы, но необходимо внести изменения в уравнения равновесия и граничные условия.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Куликов, И.С. Прочность элементов конструкций при облучении / И.С. Куликов, В.Б. Нестеренко, Б.Е. Тверковкин. – Минск: Наука и техника, 1990.
- Куликов, И.С. Прочность тепловыделяющих элементов быстрых газоохлаждаемых реакторов / И.С. Куликов, Б.Е. Тверковкин. – Минск: Наука и техника, 1984.

УДК 621.791:658.562

*Хмелёв А.А., Бравков А.А.*

#### УПРОЩЕННЫЙ МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ ДИОГРАММ ХРУПКОВЯЗКОГО СОСТОЯНИЯ СТАЛИ

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Беларусь*

Известны диаграммы хрупко-вязкого состояния сталей [1], позволяющие оценивать состояние конструкций неразрушающими методами контроля по результатам измерения максимальной твердо-

сти по Бринеллю их локально деформированных зон. Это связано с тем, что в большинстве случаев трещины в конструкциях возникают и развиваются из указанных зон, в которых исходная пластичность стали снижена от применяемых технологических операций типа холодная гибка, сварка в совокупности со снижением температуры эксплуатации. Далее в процессе эксплуатации конструкция накапливает уровень предварительных повреждений от эксплуатационной нагрузки.

Критическим становится уровень, накопленный предварительной деформации, если он в зоне максимальных силовых и температурных воздействий приближается или становится равным окончанию равномерной деформации растяжения и началу образования шейки в образце при испытании стали на растяжение. В такой зоне в этом состоянии возникают внутренние трещины и микротрещины, не выходящие на поверхность. В дальнейшем от эксплуатационных нагрузок развитие трещин в этих зонах неизбежно. Такие зоны имеют максимальную твердость с пиковой формой её распределения по отношению к твердости окружающего материала. Ширина такой зоны иногда составляет 1..3 мм.

На рис.1 такая диаграмма приведена для стали Ст5. Она построена следующим образом. Заготовки для изготовления ударных образцов предварительно деформируют растяжением на 5,10,15% и до уровня начала образования шейки. Готовые образцы, вырезанные из предварительно деформированных заготовок, испытывают на ударную вязкость при температурах: +20,0,-20,-40,-60°C, измеряя на этих образцах твердость по Бринеллю перед испытанием.

Левая крайняя верхняя точка диаграммы соответствуют твердости и энергии поглощенной образцом при разрушении при температуре +20°C. Верхняя кривая диаграммы, на которой приведены уровни предварительной пластической деформации, характеризуют снижение поглощенной энергии и соответственно повышающейся при этом твердости, при температуре испытания +20 °C. Аналогично проведены и кривые результатов испытаний при температурах -20, -40 и -60°C. Эти кривые исходят из точек на левой крайней наклонной кривой, на которой приведены значения поглощенной энергии образцов, вырезанных из стали в состоянии поставки и испытанных при указанных температурах.

Правая крайняя точка диаграммы соответствует максимальной твердости стали и минимальной поглощенной при разрушении энергии.

Целью настоящей работы является показать возможность построения указанных диаграмм по результатам сертификатных характеристик стали, не прибегая к трудоемким экспериментальным исследованиям.

Координаты крайней, левой точки такой диаграммы определяют по значениям поглощенной энергии пересчетом сертификатных значений ударной вязкости, а твердость по известной зависимости прочности стали от её твердости по Бринеллю.

Координаты твердости и поглощенной энергии для правой крайней точки диаграммы получают следующим образом. Значение максимальной твердости определяемой по формуле

$$HB_{max} = HB_0 \cdot e^{\varphi} \quad (1)$$

где  $HB_0$  - твердость стали, соответствующая крайней левой точке;  $\varphi$  - сертификатное значение относительного сужения.

Минимальное значение поглощенной энергии определяют по формуле.

$$U_{mix} = \frac{\sigma_b^2}{2E} \cdot V. \quad (2)$$

где  $\sigma_b$  - сертификатное значение предела прочности стали МПа;  $V$  – объем ударного образца, мм<sup>3</sup>;  $E$  – модуль Юнга.

Формула (2) устойчиво подтверждается экспериментально. Это объясняется тем, что прочность материала в шейке перед разрушением характеризуется значением истинного напряжения  $S$ , которое определяют по известной формуле.

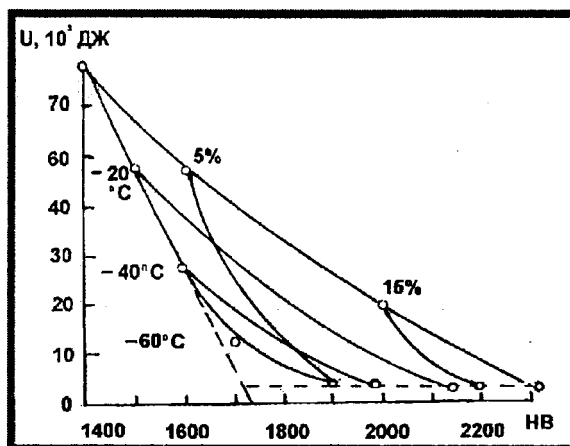


Рисунок 1- Диаграмма хрупко-вязкого состояния стали Ст5, построенная по сертификатным данным.

$$S = \frac{\sigma_b}{1 - \psi} \quad (3)$$

При полном исчерпании пластичности стали от предварительной пластической деформации перед разрушением значение  $\psi$  в (3) стремиться к нулю. В этом случае получаем, что  $S = \sigma_b$ .

Значение поглощенной энергии, как координат точек на левой наклонной кривой диаграммы получают пересчетом значений сертификатных значений ударной вязкости для температур  $-20$  и  $-40^\circ\text{C}$ .

Значения координат твердости этих точек определяют следующим образом. Известно[2], что при снижении температуры от  $+20$  до  $-70^\circ\text{C}$  твердость малоуглеродистой и низколегированной стали увеличиваются в среднем на 20%. Поэтому начальный участок данной кривой на участке значений твердости и поглощенной энергии заменяем прямой линией, проведенной из левой верхней крайней точки диаграммы через точку на оси абсцисс, соответствующую увеличению исходной твердости на 20%. Правомерность такого приёма обусловлена тем, что рассматриваемая кривая на участке температур от  $+20$  до  $-40^\circ\text{C}$  близка к прямой.

Для построения верхней кривой диаграммы достаточно знать координаты двух промежуточных точек, расположенных между крайней левой максимальной и крайней правой минимальной точкой. Координаты этих точек определяют следующим образом. Для выбранного значения твердости определяют пластичность стали по формуле

$$\psi_k = \ln \frac{h_k}{h_{min}} \quad (4)$$

где  $\psi_k$  - пластичность стали для выбранного значения твердости;

$h_k$  - глубина отпечатка при измерении твердости стали по Бринеллю для выбранного значения;

$h_{min}$  - глубина отпечатка, соответствующая твердости правой крайней точки диаграммы.

Значение поглощенной энергии определяется по формуле

$$U = a_v \cdot v_k^v \quad (5)$$

где  $a_v$  - удельная работа пластического деформирования и разрушения стали, являющаяся константой для каждой конкретной плавки стали.

Значение  $a_v$  можно определить по приближенной формуле

$$U = \frac{U}{V\psi} \quad (6)$$

где  $U$  - значение поглощенной энергии ударным образом при температуре  $+20^\circ\text{C}$

Нижнюю часть диаграммы заменяют прямой параллельной оси абсцисс, считая постоянным минимальное значение поглощенной энергии.

Если диаграмма оканчивается результатами сертификатных значений поглощенной энергии для температуры  $-40^\circ\text{C}$ , то от точки соответствует этой температуре на крайней левой кривой проводят эквидистантную кривую относительно кривой для температуры  $+20^\circ\text{C}$  до её пересечения с нижней горизонтальной линией. На рис-1 такие линии проведены для температур  $+20$ ,  $-20$ ,  $-40$  и  $-60^\circ\text{C}$ . Штриховые линии диаграммы используются как вспомогательные.

Такие диаграммы можно использовать для оценки состояния сталей неразрушающими методами контроля, как при эксплуатации, так и при проектировании конструкции.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Хмелёв А.А., Сидоров В.А. Механика разрушения. Курс лекций., Мн.: БНТУ, 2007. 137с.
2. В.И. Васильев, М.Б. Рощин. Судостроительные материалы. Л.: Судостроение, 1971, 116с.