

ОЦЕНКА ПРЕДЕЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ПОВРЕЖДЕННОГО ГИБА ТРУБОПРОВОДА АЭС

В.М. Маркочев

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва



Предложена методика расчета предельного состояния поврежденного участкагиба трубопровода, базирующаяся на результатах испытаний гладкого образца, и соответствующего ему образца с надрезом. Геометрия надрезанного образца всецело зависит от отношения предела текучести к пределу прочности. Расчетная схема является упрощенным вариантом метода реальных элементов, критерий разрушения – деформационный.

Ключевые слова: поврежденный гиб, трубопровод АЭС, предельное состояние.
Key words: damaged bend, pipe nuclear power plant, limiting condition.

Гибы, изготовленные на трубогибном оборудовании и применяемые в качестве деталей трубопроводов АЭС и ТЭС, имеют сложную геометрию и толщину, изменяющуюся по азимутальному углу φ . Это затрудняет анализ предельного состояния и степени безопасностигиба при наличии дефекта, обнаруженного во время плановой диагностики трубопроводов. Ниже описана экспериментально-расчетная методика оценки предельного состояниягиба трубопровода АЭС, поврежденного окружной трещиной. Предполагается, что гиб нагружен внутренним давлением q , продольной силой P_x и изгибающим моментом M_z . Методика расчета включает в себя

- испытание конструкционного материалагиба по ГОСТ 1497-84, определение значений предела текучести σ_y , предела прочности (временного сопротивления) σ_b и истинного сопротивления разрушению σ_k (отношение разрушающей нагрузки к соответствующей площади минимального сечения образца);
- конструирование в полном соответствии с результатами испытаний материалагиба по ГОСТ 14-97 вспомогательного надрезанного образца, имитирующего повреждение материала реальногогиба;
- испытание вспомогательного образца с надрезом и определение значения предельного упругопластического удлинения Δ_k , обусловленного, в основном, локальным упругопластическим течением материала в области надреза;
- расчет предельных значений силовых (P_x – продольная сила, M_z – изгибающий момент) и деформационных (Δ_0 – осевое удлинение, θ – угловая деформация) параметров нагружения, соответствующих принятому деформационному критерию прочности $\Delta \leq \Delta_k$ в условиях эксплуатации рассматриваемогогиба.

Для изготовлениягиба используется прямая труба с внешним диаметром D_a при номинальной толщине t . Если использовать концепцию «равнопрочногогиба», то

можно допустить, что при изготовлении гiba средний радиус R_m остается неизменным, а изменяется толщина стенки s , которая становится функцией угла φ . Чтобы значения окружных напряжений не зависели от азимутального угла φ , толщина гiba должна быть следующей функцией угла φ :

$$s(\varphi) = \frac{t}{2} \cdot \frac{2R_s + R_m \cos(\varphi)}{R_s + R_m \cos(\varphi)}, \quad (1)$$

где R_s – радиус оси гiba, $R_m = (D_a - t)/2$. При выполнении условия (1) зависимости от угла φ внутреннего радиуса $r(\varphi)$ и внешнего радиуса $R(\varphi)$ трубы гiba приобретают следующий вид (рис. 1):

$$r(\varphi) = R_m - \frac{s(\varphi)}{2}; \quad R(\varphi) = R_m + \frac{s(\varphi)}{2}. \quad (2)$$

Смещение ζ центра тяжести поперечного сечения вниз от оси гiba (рис. 1) равно

$$\zeta = \frac{\int_0^\pi \left[\int_{r(\varphi)}^{R(\varphi)} \rho^2 \cos(\varphi) d\rho \right] d\varphi}{\int_0^\pi \left[\int_{r(\varphi)}^{R(\varphi)} \rho d\rho \right] d\varphi}, \quad (3)$$

где ρ – радиус-вектор точки поперечного сечения гiba. Осевая сила P_{qx} , обусловленная внутренним давлением q , равна

$$P_{qx} = 2q \int_0^\pi \left(\int_0^{r(\varphi)} \rho d\rho \right) d\varphi. \quad (4)$$

С учетом уравнений (3) и (4) получаем значение дополнительного изгибающего момента:

$$M_{qz} = P_{qx} \zeta. \quad (5)$$

Для гiba, изготовленного из трубы с внешним диаметром $D_a = 325$ мм с номинальной толщиной стенки $t = 19$ мм и $R_m = 153$ мм, нагруженного внутренним

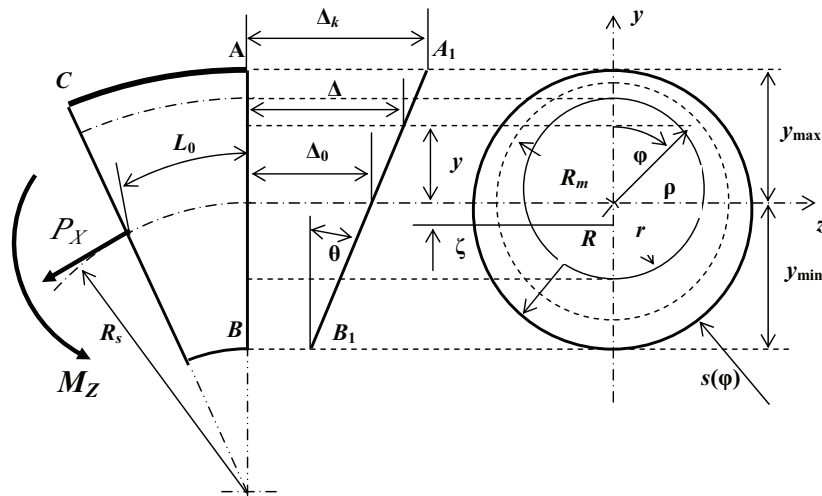


Рис. 1. Геометрия равнопрочного гiba и расчетная схема

давлением $q = 10$ МПа, $\zeta = -16,7$ мм и $P_{qx} = 643$ кН. При радиусе оси гiba $R_s = 2,5R_m = 383$ мм, $u_{\max} = 161$ мм, $u_{\min} = -166$ мм, $s(0) = 16,3$ мм и $s(\pi) = 25,3$ мм.

Если нет возможности провести испытания материала гiba по ГОСТ 1497-84, то для расчета диаграмм деформирования по стандартным механическим свойствам используем значения модуля упругости E , предела текучести σ_{02} , предела прочности (временного сопротивления) σ_b и относительного удлинения на пределе прочности δ как при растяжении, так и при сжатии. Для материала гiba примем следующие значения механических свойств при растяжении: модуль упругости при растяжении $E = 2 \cdot 10^5$ МПа; коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$; предел текучести $\sigma_{02} = 400$ МПа, предел прочности $\sigma_b = 700$ МПа, равномерное относительное удлинение $\delta = 5$ %. Механические свойства при сжатии численно равны свойствам при растяжении.

Для обеспечения консервативности расчетов будем использовать билинейную диаграмму растяжения-сжатия «напряжение-относительная деформация», соответствующую принятым механическим свойствам материала гiba (рис. 2).

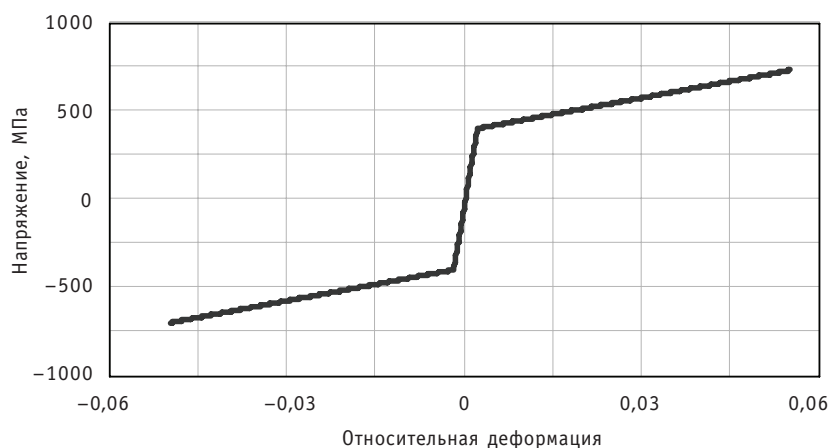


Рис. 2. Расчетная диаграмма растяжения-сжатия конструкционного материала гiba

Сопротивление разрушению поврежденного материала гiba зависит от способности материала к локальной пластической деформации в области, примыкающей к обнаруженному дефекту. Для экспериментальной оценки этой способности предлагается провести испытание надрезанного образца, изготовленного также из материала гiba, но сконструированного с использованием известных механических свойств и так, чтобы пластическая деформация образца вплоть до разрушения имела место только в области, примыкающей к надрезу. Поэтому надрезанный образец, например, цилиндрический образец с максимально острым кольцевым надрезом (рис. 3) должен удовлетворять следующему условию.

Площадь надрезанного сечения F_H должна соотноситься с площадью сечения брутто F_B в соответствии с условием, которое гарантирует разрушение образца без пластической деформации в ненадрезанных сечениях:

$$F_B \sigma_{02} = F_H \sigma_b. \quad (6)$$

Только при этом условии удлинение надрезанного образца Δ_k может служить критериальной расчетной характеристикой.

Для цилиндрического образца $F_B = \frac{\pi D^2}{4}$, $F_H = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi(D-2a)^2}{4}$. Поэтому глубина надреза a в соответствии с условием (6) должна быть не меньше чем

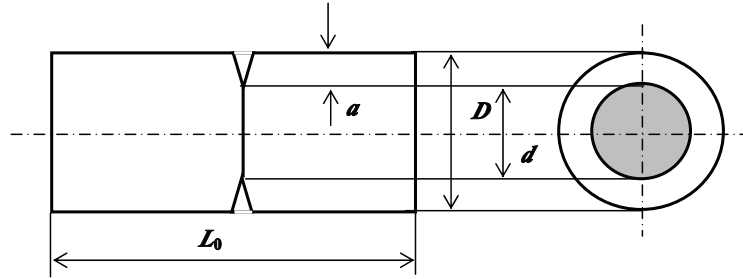


Рис. 3. Цилиндрический образец с кольцевым надрезом

$$a = \frac{D}{2} \left(1 - \sqrt{\frac{\sigma_{02}}{\sigma_b}} \right). \quad (7)$$

Целью испытаний на растяжение образца с надрезом является запись диаграммы растяжения и на той же базе L и определение значения предельного упругопластического удлинения образца Δ_k , которое в дальнейшем используется в расчетах в качестве критериального, соответствующее предельному состоянию поврежденного участка трубопровода. Для усиления стеснения пластической деформации в формулах (6) и (7) значение предела прочности σ_b следует заменить на значение истинного сопротивления разрыву $\sigma_k > \sigma_b$.

Для расчетов предельного состояния рассмотрим поврежденный отрезок гiba длиной L_0 по его оси (рис. 1). Предположим, что поврежденное «волокно» CA находится на внешнем ободе гiba, и значение Δ_k нам известно. Тогда при нагружении гiba продольной силой и изгибающим моментом в присутствии внутреннего давления (сечение АВ) в соответствии с принятой гипотезой плоских сечений переместится в положение A_1B_1 .

Как следует из рис. 1, удлинение волокна Δ с координатой y , находящегося на расстоянии ρ от оси трубы под углом φ , равно

$$\Delta = \Delta_k - (y_{\max} - y)\theta, \quad (8)$$

где θ – угловое перемещение правого торца трубы; $y = \rho \cos(\varphi)$. Осевое удлинение Δ_0 отрезка трубы равно

$$\Delta_0 = \Delta_k - \theta y_{\max}. \quad (9)$$

Длина продольного «волокна» $L(y)$ отрезка гiba зависит от координаты y :

$$L(y) = L_0 \left(1 + \frac{y}{R_s} \right). \quad (10)$$

Осевая относительная деформация, обусловленная окружными напряжениями от внутреннего давления,

$$\varepsilon(q) = -\frac{\mu q R_m}{E t}. \quad (11)$$

Следовательно, учитывая уравнения (8), (10) и (11), получаем следующее выражение для относительной деформации «волокна»:

$$\varepsilon(y, \theta, \Delta_k, q) = \frac{\Delta_k - (y_{\max} - y)\theta}{L_0 \left(1 + \frac{y}{R_s} \right)} + \frac{\mu q R_m}{E t}, \quad (12)$$

где $y = \rho \cos(\varphi)$.

Диаграмма упругопластического растяжения-сжатия и ее аналитическое выражение $\sigma(\varepsilon)$ известны (рис. 2), относительная деформация определяется уравне-

нием (12), предельно допустимая деформация верхнего волокна Δ_k известна из испытания надрезанного образца. Допустим, что также известна продольная сила P_x , увеличивающая или уменьшающая продольную силу P_{qx} по уравнению (4). Следовательно, предельное состояние поврежденной трубы будет определяться предельным изгибающим моментом M_{zc} и соответствующей ему угловой деформацией θ_c . Для их вычисления с учетом уравнений (2), (4) и (5) составим и решим систему двух уравнений равновесия:

для продольных сил

$$P_x + P_{qx}(q) = 2 \int_0^\pi \left(\int_{r(\varphi)}^{R(\varphi)} \sigma(\varepsilon(\rho \cos(\varphi), \theta, \Delta_k, q)) \rho d\rho \right) d\varphi; \quad (13)$$

и для изгибающих моментов

$$M_z + (P_x + P_{qx}(q))\zeta = 2 \int_0^\pi \left(\int_{r(\varphi)}^{R(\varphi)} \sigma(\varepsilon(\rho \cos(\varphi), \theta, \Delta_k, q)) \rho^2 \cos(\varphi) d\rho \right) d\varphi. \quad (14)$$

Численное решение системы уравнений при $P_x = 1500$ кН, $q = 10$ МПа и $\Delta_k = 0,5$ мм дает следующие значения предельного изгибающего момента и предельной угловой деформации: $M_{zc} = 604$ кН.м; $\theta_c = 0,12$ град. Удлинение оси отрезка гiba в соответствии с уравнением (9) равно $\Delta_0 = 0,17$ мм.

Численное решение системы уравнений относительно M_z и θ в настоящее время осуществляется просто, например, с применением Mathcad. Эпюру осевых напряжений σ_x в сечении балки построим, используя для этого формулу

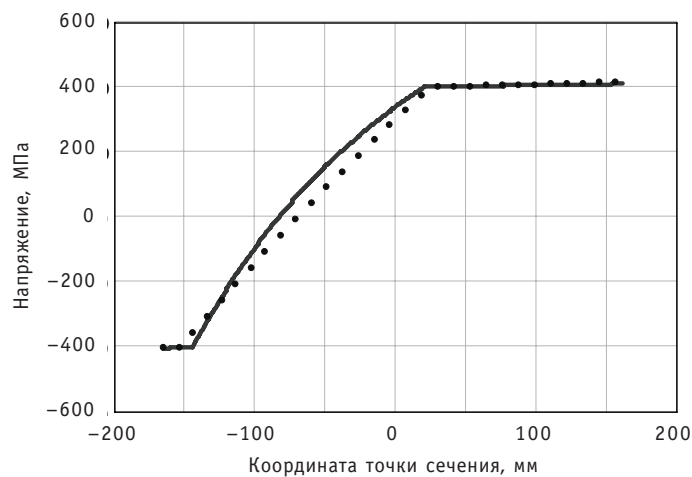


Рис. 4. Эпюры напряжений для двух значений радиуса гiba: — — $R_s = 2,5R_m$; — $R_s = 10R_m$

$$\sigma_x(y) = \sigma \left(\frac{\Delta_0 + \theta_A y}{L_0 \left(1 + \frac{y}{R_s} \right)} \right). \quad (15)$$

На рисунке 4 приведены эпюры предельных напряжений, построенные по уравнению (15) для двух значений радиуса R_s гибов, изготовленных из одной трубы.

Как следует из рис. 4, увеличение радиуса гiba приводит к спрямлению эпюры напряжений в упругой области. В связи с этим заметим, что рассмотренный алгоритм расчета предельного состояния гiba применим и для прямого отрезка трубопровода. Для этого значение радиуса гiba достаточно принять очень большим, например, положить $R_s = 100 R_m$.

В заключение отметим, что рассмотренная методика может применяться, если глубина обнаруженного дефекта не превышает половины толщины трубы, а окружной размер дефекта менее двух толщин трубы. Для дефектов (трещин) большего размера желателен переход к расчетам с использованием метода реальных элементов [1].

Литература

1. Маркочев В.М., Шамраев Ю.В. Расчет прочности поврежденных трубопроводов атомных электростанций методом реальных элементов // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 1999. – №2. – С.26-32.

Поступила в редакцию 8.08.2011

УДК 621.039.519

Results of Calculated Experimental Justification of Support and Conditions of Mass Tests of SM Experimental Fuel Assemblies with Increased Uranium Load \V.A. Tsikanov, V.A. Starkov, A.P. Malkov, M.N. Svyatkin, A.V. Klinov, A.L. Petelin, Yu.A. Krasnov, Yu.B. Chertkov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 102 pages, 6 tables, 1 illustration. – References, 15 titles.

The technical feasibility and safety of SM core conversion for operation with increased uranium content rods using the standard fuel reloading were justified on the basis of the results of calculated experimental investigations. The experimental investigations of core physical characteristics and the mass tests of the experimental fuel assemblies on the basis of the rods loaded with 6g 235U were carried out. Technical-economical characteristics of the reactor with experimental FA were analyzed. The data required for amendments of the reactor design documentation and conversion of the new FA from the experimental assembly category to the standard one are obtained.

УДК 621.039.534

Experimental Sample of IVA-M Device for Monitoring of Hydrogen in Sodium Coolant \V.V. Alekseev, G.P. Sergeev, P.S. Kozub, V.V. Matyukhin, A.P. Sorokin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 9 pages, 2 tables, 5 illustrations. – References, 5 titles.

Experimental sample of IVA-M device for Monitoring of hydrogen in sodium is developed which includes the primary converter from the indicator IVA- 1Y (high vacuum block with nickel membrane and magnet pump NMD-0,0063, in addition equipped by thermostat), structurally advanced sodium block with recuperator and graduation block.

The chosen design of technological (sodium) block of IVA-M has the nominal sodium flow rate 0,1 m³/h (WILLOW – AT), much smaller dimensions and reduced approximately in 3 time transport time in sodium path of device in comparison with IVA- 1Y.

The experimental sample of IVA-M device is manufactured and tested on sodium loop ZU-3M.

The tests of the experimental sample of IVA-M device e have shown conformity of its characteristics to parameters stipulated by technical project on development of the device.

УДК 621.039.58

Risk Assessment for NPPs with RBMK Reactors \R.T. Islamov, A.A. Derevyankin, I.V. Zhukov, M.A. Berberova, S.S. Dyadyura, Ju.A. Mardashova, R.Sh. Kalmetiev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 7 pages, 2 tables, 2 illustrations. – References, 7 titles.

We have made the comparative risk assessment for NPPs with RBMK reactors and describe the results of risk index calculations required for Kursk NPP safety passports, which are compulsory for each hazardous industrial facility in accordance with the legislation of the Russia Federation. The output of this research is the assessment of risk index systems in physical and economical terms, social risk (F-N curves) and material damage (F-G curves) charts for Kursk NPP.

УДК 621.039.566

Limiting State Estimation of Damaged Pipe Bend Nuclear Power Plant \V.M. Markochev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 6 pages, 4 illustrations. – References, 1 title.

The method of calculating the limit state of the damaged section bend of pipeline, based on test results of smooth specimen, and the corresponding notched. Geometry of notched specimen is entirely dependent on the ratio of yield strength to ultimate strength. Design scheme is a simplified version of the method of real elements, the criterion of destruction – the strain criterion.