

ждения окружные напряжения принимают отрицательное значение (см. рисунок 2, а), что согласуется с результатами испытаний отрезков труб внутренним давлением. Присутствует парадоксальный факт: при наличии внутреннего давления, труба «распирается» наружу во всех областях, кроме поврежденной, которая втягивается внутрь. Геометрия повреждения так перераспределяет давление, что в некоторой области оно меняет свой знак. Следовательно, радиальные напряжения на эллиптическом повреждении могут иметь максимум (хотя бы локальный, но обязательно положительный) в некоторой точке нормального сечения трубы, т.к. на свободной поверхности  $\sigma_r = 0$ .

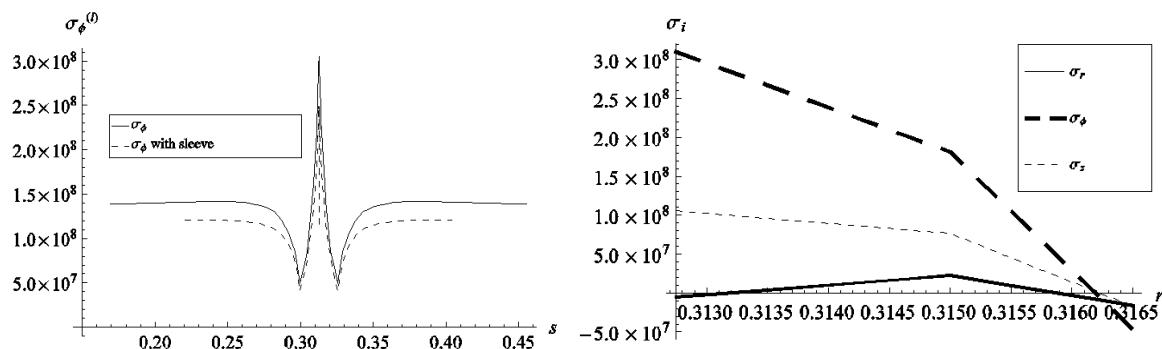


Рисунок 2 – Распределения окружных напряжений по окружному пути на внутренней поверхности трубы в окрестности повреждения эллиптического типа в наиболее глубоко поврежденной части (а), распределения напряжений  $\sigma_r$ ,  $\sigma_\phi$ ,  $\sigma_z$  в трубе со смешанным повреждением в радиальном направлении в нижней точке поврежденной области от центра к внешней поверхности намотки (б)

Из рисунка 2, а видно, что муфта уменьшает величину окружных напряжений примерно на 15–20%. Излом напряжений на рис. 2, б указывает на стык муфты и поверхности трубы.

В докладе проводится детальный анализ напряженно-деформированного состояния моделей труб магистральных трубопроводов с учетом различных коррозионных повреждений и намоток.

## ТЕСТИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ РАМНОЙ КОНСТРУКЦИИ КОМПАКТНОГО МЮОННОГО СОЛЕНОИДА

Ларченков Л. В.<sup>1</sup>, Протасеня И. О.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Белорусский национальный технический университет, Минск

<sup>2</sup> ОАО «АМКОДОР – Управляющая кампания холдинга», Минск

**Введение.** Унитарным предприятием «Минский машиностроительный завод» им. Октябрьской революции (УП МЗОР) изготовлены элементы рамной конструкции компактного мюонного соленоида (КМС) для большого адронного коллайдера (БАК) по заказу Европейская организация ядерных исследований (ЦЕРН). Коллайдер – устройство, в котором производится разгон

протонов водорода до скорости света и столкновение их в КМС. В КМС происходит измерение энергий и фотографирование образовавшихся пучков мелких частиц. Научное обоснование по разработке КМС осуществлял Национальный центр физики частиц и высоких энергий (НЦ ФЧВЭ) БГУ. Детали конструкции КМС, изготовленные на УП МЗОР, были: прототип соленоида; поглотитель (латунь); задний фланец поглотителя с интерфейсной системой и валом; средний диск; 18 рам и монтажные устройства [1, 2].

Элементы (9 рам) скреплены таким образом, что образуют кольцо диаметром  $d = 6,0$  м, высота кольца  $h = 1100$  мм (размер  $h$  измеряется по оси кольца).

На кафедре «Сопротивление материалов машиностроительного профилья» БНТУ проведено тестирование рам на прочность методом неразрушающего контроля (согласно договору с НЦ ФЧВЭ).

Сущность метода заключается в расчете внутренних напряжений и деформаций под воздействием сильных магнитных полей сверхпроводящих магнитов Коллайдера. Энергия магнитного поля составляет 3 ГДж, а величина магнитной индукции – 4 Тл. Величина магнитной индукции рассчитана по формуле Максвелла  $2F = B^2S/(2\mu_0)$ . Материал рам: сталь нержавеющая 03Х20Н16АГ6. Допускаемое нормальное напряжение материала рамы  $[\sigma] = 216 - 440$  МПа; размеры:  $a = 434$  мм;  $2c = 894$  мм. Жесткость всех стержней ( $a$  и  $2c$ ) рамы одинакова:  $EI = \text{const}$  [3].

Расчетная схема представлена на рисунке 1.

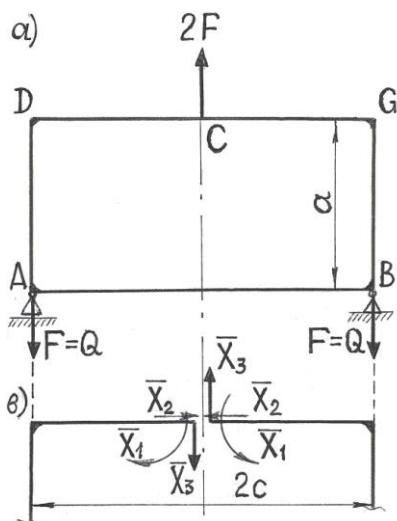


Рисунок 1 – Основная расчетная схема

**Методика расчета.** Рама симметрична относительно вертикальной и горизонтальной плоскостей. Рама представляет собой дважды статически неопределенную систему, к решению применим метод сил. Составляем два канонических уравнения. Получаем решение – алгебраические уравнения.

$$\frac{1}{3}Na^2(a+3c) + \frac{1}{2}Ma(a+2c) = \frac{1}{4}F_Aac(a+2c),$$

$$\frac{1}{2}Na(a+3c) + M(a+2c) = \frac{1}{6}F_A c(3a+4c).$$

Подставив значения в канонические уравнения и решив, найдем изгибающие моменты. Строим эпюры изгибающих моментов. Находим значения величин, по которым строим эпюры поперечных сил, изгибающих моментов и нормальных сил:

$$N = 148 \text{ кН}, M = 54,6 \text{ кН}\cdot\text{м}.$$

Величина изгибающего момента в верхнем левом углу рамы

$$M_D = M - \frac{1}{2}Fc = -57,15 \text{ кН}\cdot\text{м}.$$

Величина момента в нижнем левом углу рамы

$$M_A = M_D + Na = 7,08 \text{ кН}\cdot\text{м}.$$

Так как рама симметрична в вертикальной плоскости, проходящей через току С, (рисунок 1), то  $M_B = M_A = 7,08 \text{ кН}\cdot\text{м}$ ,  $M_D = M_C = 57,15 \text{ кН}\cdot\text{м}$ . По этим величинам изгибающих моментов делаем проверку наиболее опасного стержня  $DG$ . Строим эпюры изгибающих моментов и под ними эпюру изгибающего момента от силы  $F_0 = 1 \text{ кН}$ , приложенной в сечении  $C$ . Половины площадей первых двух эпюр будут

$$\omega_1 = \frac{1}{2}(M + M_D)c \approx 25,5 \text{ кН}\cdot\text{м}^2.$$

Ординаты эпюр единичных моментов, соответствующие положениям центров тяжести первых двух эпюр  $(M_1)_0 = 1 \text{ м}$  и  $(M_2)_0 = 3/4 \text{ м}$ . Сумма произведений  $\omega M_0 = 11,75 \text{ кН}\cdot\text{м}^3$ . Искомый прогиб составит  $y_C = 1,15 \text{ мм}$ .

Определим размеры прямоугольного поперечного сечения ригеля рамной конструкции. Отношение сторон  $h/b = 1$ . Наибольшие растягивающие силы  $N$  и изгибающий момент  $M$  возникнут в нижней точке сечения. Получим, что площадь в опасном поперечном сечении  $A = 92,16 \text{ см}^2$  меньше, чем в натуральном стержне  $A_3 = 96 \text{ см}^2$ . Прочность с рамы обеспечена.

**Выводы.** Теоретический расчет геометрических параметров поперечных сечений и тестирование готовых изделий подтверждают их прочность в эксплуатации КМС. Практика показывает, что не для всех материалов и условий их работы этот метод применим, так как в нем не учитывается фактор времени (цикличности работы и скорости).

### Литература

1. отрудничество ОИЯИ с институтами, университетами и предприятиями Белоруссии: Материалы ученого совета. – Дубна. – 2002. – 84 с.
2. Калашников С. Г. Электричество. – М.: Наука. – 1977. – 592 с.
3. Научно-исследовательские работы по изучению упруго-пластических свойств материалов рам адронного калориметра установки CMS: отчет о НИР (заключ.) / БНТУ; рук. Ларченков Л.В.; исполн.:Степанович Р.В. [и др.]. – Мин., 2001. – 45 с.– № ГР 15 / 11-01.
4. Ржаницин А. Р. Теория ползучести. – М.: Стройизд. – 1968. – 416 с.