

а)



б)

Рис. 4. Восстановленные компенсаторы Ду 2000 непосредственно на доменной печи (а) и Ду 1200 в условиях проверки герметичности в механическом цехе (б)

пример, масла, вследствие вышедшего из строя уплотнения, без демонтажа и замены уплотнения. В частности в нашей практике успешно выполнена герметизация разъема между корпусом и рамой крупного судового дизеля-генератора, отремонтированы локальные повреждения кабельной оплетки, восстановлена поверхность обрезиненного вала и многое другое.

**Вывод**

Разработана технология применения двухкомпонентных эластомеров при ремонте обо-

рудования коксохимических и доменных цехов. Успешная эксплуатация восстановленных транспортных лент и линзовых компенсаторов доказала целесообразность применения разработанных технологических решений при возникновении аварийных ситуаций, когда традиционные методы ремонта либо малоэффективны, либо требуют больших материальных затрат.

**Поступила 22.09.2014**



УДК 531.8

Наука

Разумов М. С. / к. т. н./, Гладышкин А. О. / к. т. н./  
Кассихин В. Н., Пыхтин А. И. / к. т. н./, Скрипкина Е. В./ к. т. н./  
Юго-Западный государственный университет

## Расчет на прочность моментопередающего вала с профилем на базе треугольника «Рёло»

*В работе рассматривается подробный расчет полярного момента инерции для сечения в форме треугольника «Рёло». С помощью полученных зависимостей становится возможным определить с высокой точностью касательные напряжения, возникающие в профильном соединении при передаче крутящего момента. Также в статье описан программный модуль для прочностного расчета профильных валов, позволяющий произвести прочностную проверку и коррекцию габаритных параметров профильного моментопередающего соединения на базе треугольника «Рёло». Ил. 3. Библиогр.: 5 назв.*

**Ключевые слова:** полярный момент инерции, осевой момент инерции, кручение, треугольник «Рёло», профильное соединение, касательное напряжение

*Detailed calculation of polar moment of inertia for cross section of Reuleaux triangle form is considered. With the help of received dependences, it is possible to determine to a high precision concerning stress, appearing in profile connection during torque transmission. Also software module for strength prediction of profiling rolls is described. It allows to fulfill strength check and adjustment of overall parameters of profile moment transmitting connection on the base of Reuleaux triangle.*

**Keywords:** polar moment of inertia, axial moment of inertia, twisting, Reuleaux triangle, profile connection, tangential stress

Расчет моментопередающих соединений на кручение, в основном, заключается в определении максимального касательного напряжения в

поперечном сечении. Основная расчетная формула для определения тангенциального напряжения в точке с координатой  $y$

© Разумов М. С. / к. т. н./, Гладышкин А. О. / к. т. н./, Кассихин В. Н., Пыхтин А. И. / к. т. н./, Скрипкина Е. В./ к. т. н./, 2014 г.

$$\tau = \frac{T_{\max} \cdot y}{I_p},$$

где  $T_{\max}$  – максимальный крутящий момент, передаваемый валом;  $I_p$  – полярный момент инерции сечения;  $y$  – координата, где необходимо определить напряжение.

Когда сечение имеет простую форму, определение  $I_p$  не составляет никаких сложностей. В общем виде его можно представить в виде суммы двух осевых моментов инерции

$$I_p = I_{Xc} + I_{Yc}, \quad (1)$$

где  $I_{Xc}$  и  $I_{Yc}$  – осевые моменты инерции сечения.

Моментопередающее соединение, выполненное на базе треугольника «Рёло» (рис. 1), имеет в поперечном сечении достаточно сложный профиль. Он состоит из трех круговых сегментов (1) и треугольника (2). Центры окружностей, описывающие круговые сегменты, лежат в вершинах треугольника. Сторона треугольника  $c$  (она же является параметром  $R$  на рис. 1) определяется по формуле

$$c = R = \frac{D\sqrt{3}}{2}.$$

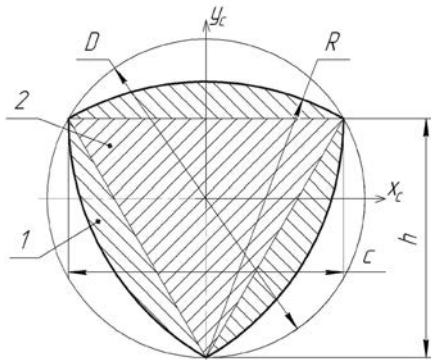


Рис. 1. Определение полярного момента инерции треугольника «Рёло»

Высота  $h$  треугольника определяется следующим образом:

$$h = \frac{c\sqrt{3}}{2} = \frac{3D}{4}.$$

Полярный момент инерции треугольника равен

$$I_{\text{тре-ка}} = \frac{ch^3}{36} + \frac{hc^3}{48} = \frac{3\sqrt{3}D^4}{256} = 0,0203D^4. \quad (2)$$

Полярный момент инерции кругового сегмента можно определить по формуле (рис. 2)

$$I_{\text{сегм.}} = I_{Xc1\text{сегм.}} + I_{Yc\text{сегм.}} - A \cdot y_c^2 + A \cdot \left(y_c - \frac{D}{2}\right)^2, \quad (3)$$

где  $I_{Xc1\text{сегм.}}$  и  $I_{Yc\text{сегм.}}$  – осевые моменты сегмента;  $A$  – площадь кругового сегмента;  $y_c$  – координата центра тяжести сегмента.

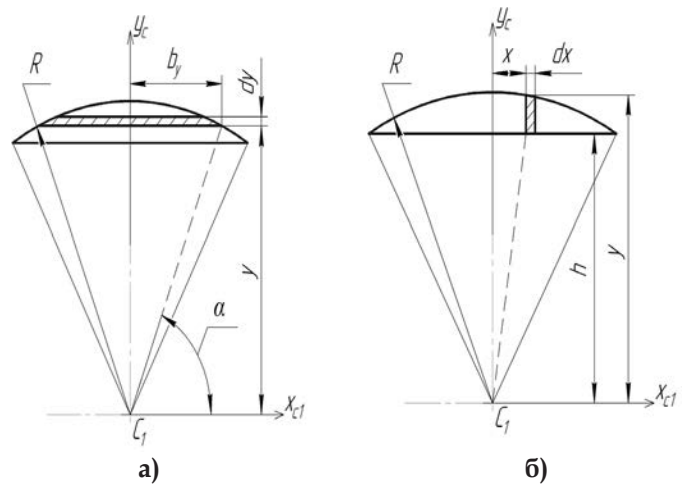


Рис. 2. Определение полярного момента инерции кругового сегмента:

а – относительно оси  $X_{c1}$ ; б – относительно оси  $Y_c$

Теперь определим осевые моменты инерции  $I_{Xc1\text{сегм.}}$ ,  $I_{Yc\text{сегм.}}$  и площадь кругового сегмента (рис. 2а, б).

Из курса механики твердого деформируемого тела известно следующее:

$$I_{Xc1\text{сегм.}} = \int_A y^2 dA \quad \text{и} \quad I_{Yc} = \int_A x^2 dA.$$

При вычислении  $I_{Xc1\text{сегм.}}$  элементарная площадка расположена на расстоянии  $y = R \cdot \sin \alpha$ . Соответственно  $dy = R \cos \alpha d\alpha$ . Величина  $b = R \cdot \cos \alpha$ . Площадь элементарной площадки равна  $dA = 2b \cdot dy$ . Угол может изменяться в пределах  $\frac{\pi}{3} \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2}$ . Площадь кругового сегмента равна

$$A = \int_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{\pi}{2}} dA = D^2 \left( \frac{\pi}{8} - \frac{3\sqrt{3}}{16} \right) = 0,06794D^4. \quad (4)$$

Момент инерции относительно оси  $X_{c1}$  равен

$$I_{Xc1\text{сегм.}} = \int_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{\pi}{2}} R^2 \cdot \sin^2 \alpha \cdot 2b dy = \frac{R^4}{4} \left( \frac{\pi}{6} - \frac{\sqrt{3}}{8} \right) = 0,04319D^4. \quad (5)$$

Теперь вычислим  $I_{Yc\text{сегм.}}$ .

$$I_{Yc\text{сегм.}} = 2 \int_0^{\frac{R}{2}} x^2 (\sqrt{R^2 - x^2} - h) dx,$$

где  $x = R \cos t$  – расстояние от оси  $Y$  до элементарной площадки.

Удобнее всего этот интеграл брать в параметрическом виде. Введем параметр  $t$  сле-

дующим образом:  $\cos t = \frac{x}{R}$ . Соответственно  $t = \arccos \frac{x}{R}$ ,  $dx = -R \sin t dt$ . Следовательно, у нас поменяются пределы интегрирования: при  $x_1 = 0$ ,  $t_1 = \arccos 0 = \frac{\pi}{2}$ , при  $x_2 = \frac{R}{2}$ ,  $t_2 = \arccos \frac{R}{2 \cdot R} = \arccos \frac{1}{2} = \frac{\pi}{3}$ . В итоге получим

$$I_{Y_{сегм.}} = 2 \int_{\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{3}} R^2 \cos^2 t (\sqrt{R^2 - R^2 \cos^2 t} - h) (-R \sin t dt) =$$

$$= R^4 \left( \frac{\pi}{24} - \frac{7\sqrt{3}}{96} \right) = 0,002590D^4. \quad (6)$$

Статический момент сечения сегмента относительно оси  $X_{c1}$  равен

$$S_{Xc} = \int_{\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{3}} y dA = \frac{R^3}{12}.$$

Координата центра тяжести определяется по формуле

$$y_c = \frac{S_{Xc}}{A} = 0,7967D. \quad (7)$$

Окончательно, подставляя (4), (5), (6) и (7) в (3), получаем полярный момент инерции кругового сегмента:

$$I_{p_{сегм.}} = 0,0432D^4 + 0,00259D^4 - 0,0679D^2 \cdot (0,7967D)^2 + 0,0679D^2 \cdot (0,7967D - 0,5D)^2 = 0,008633D^4. \quad (8)$$

Полярный момент инерции треугольника «Рёло» представим в виде суммы полярного момента инерции треугольника и утроенного полярного момента инерции кругового сегмента:

$$I_p = 0,0203D^4 + 3 \cdot 0,008633D^4 = 0,04619D^4. \quad (9)$$

На основе данного расчета была разработана программа для ЭВМ. Входными данными являются диаметр описанной окружности и максимальный крутящий момент, передаваемый профильным соединением. Интерфейс работы программы представлен на рис. 3.

Представленный выше математический аппарат может быть переработан и реализован для расчета пятиугольного соединения. Однако пятиугольник «Рёло» практически не встречается среди машиностроительных профилей.

Таким образом, данная методика позволит сократить время, затраченное на конструирование профильных моментопередающих соединений, полученных на базе треугольника «Рёло».

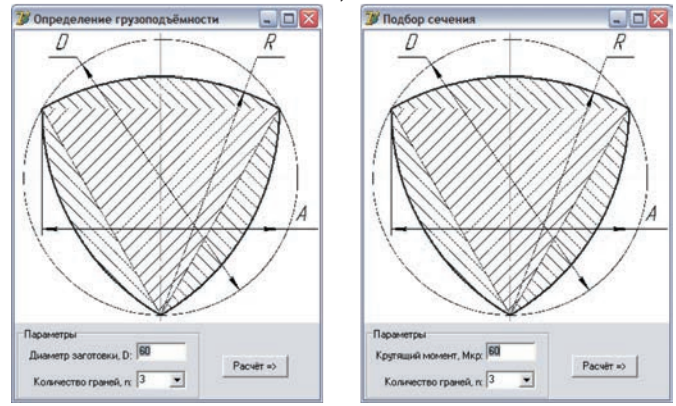
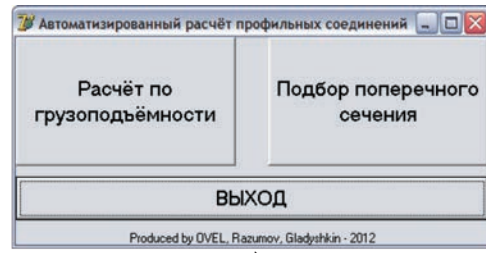


Рис. 3. Интерфейс работы программы:  
а – выбор направления расчета;  
б – расчет по допустимой грузоподъемности;  
в – подбор минимального размера поперечного сечения

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук МК-2653.2014.8.

**Библиографический список**

1. Кассихин В. Н., Разумов М. С., Гладышкин А. О., Быковская Н. Е. Автоматизация прочностного расчета многогранных валов на кручение // Известия ЮЗГУ. Серия: «Техника и технология». – 2012. – № 2. – Ч. 2. – С. 179-181.
2. Емельянов С. Г., Гладышкин А. О., Разумов М. С., Яцун С. Ф. Автоматизация технологической подготовки производства профильных валов // Известия ЮЗГУ. – 2012. – № 1-1. – С. 113-116.
3. Тимченко А. И. Технология изготовления деталей профильных бесшпоночных соединений. – М.: ВНИИТЭМР, 1988. – 160 с.
4. Писаренко Г. С. Справочник по сопротивлению материалов. – Киев: Наукова думка, 1988. – 736 с.
5. Дарков А. В. Сопротивление материалов / А. В. Дарков, Г. С. Шпиро. – М.: Высшая школа, 1975. – 656 с.

Поступила 04.09.2014