

2.3. СВАРНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ

2.3.1. Расчет нахлесточного сварного соединения

Рассчитать нахлесточное сварное соединение, изображенное на рис. 2.3.1.1, если $a = 50$ мм. Соединение нагружено силой $F = 20$ кН, действующей под углом $\alpha = 30^\circ$. Предел текучести материала деталей $\sigma_r = 400$ МПа.

Расчет

Опасное сечение нахлесточного соединения представляет собой тонкую полоску толщиной $0,7k$ (k — величина катета сварного шва), имеющую конфигурацию сварного шва. Полная длина шва, как видно из рис. 2.3.1.1, равна $9a$.

Поскольку пластина нагружена нецентральной силой, решение задачи необходимо начинать с переноса всех силовых факторов в центр тяжести опасного сечения сварного шва C (рис. 2.3.1.2). Определим положение центра тяжести (2.3.3):

$$y_C = 0; x_C = \frac{S_{y'}}{A} = \frac{0,7k \cdot 2a \cdot a \cdot 2 + 0,7k \cdot a \cdot a + 0,7k \cdot a \cdot a}{9a \cdot 0,7k} = \frac{2}{3}a.$$

Перенесем все силовые факторы в центр тяжести и перейдем к эквивалентному нагружению, которое по своему силовому воздействию равноценно исходному. В этом случае внешняя нагрузка будет складываться из заданной по условию центральной силы F и момента вращения T , вызывающего сдвиг относительно центра тяжести фигуры, составленной из сварных швов. Момент вращения, согласно рис. 2.3.1.3, равен

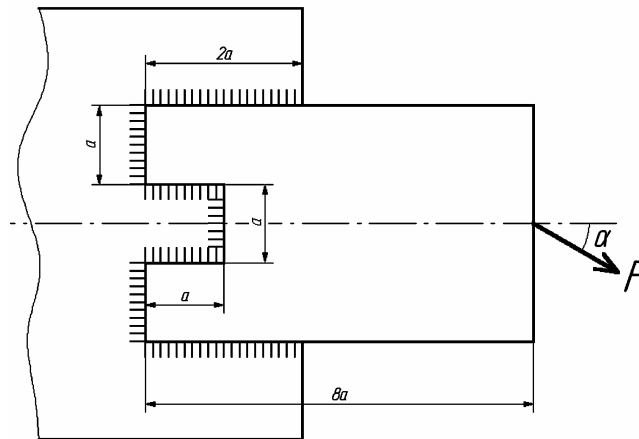


Рис. 2.3.1.1

$$T = F \sin \alpha \cdot \left(8a - \frac{2}{3}a\right) = 3,67 \cdot 10^6 \text{ Н}\cdot\text{мм}.$$

Каждый из имеющихся силовых факторов приводит к возникновению касательных напряжений, которые в силу линейной зависимости нагрузки от перемещения можно рассматривать независимо друг от друга. Касательные напряжения, вызванные силой F , в каждой точке опасного сечения можно считать постоянными по величине и противоположными внешней силе. Величину напряжений сдвига от внешней нагрузки можно рассчитать по формуле

$$\tau_F = \frac{F}{A} = \frac{F}{9a \cdot 0,7k} = \frac{2 \cdot 10^4}{9a \cdot 0,7k} = \frac{44,44}{0,7k}$$

Касательные напряжения от момента вращения распределены по длине шва неравномерно, причем в каждой точке шва вектор напряжения прямо пропорциона-

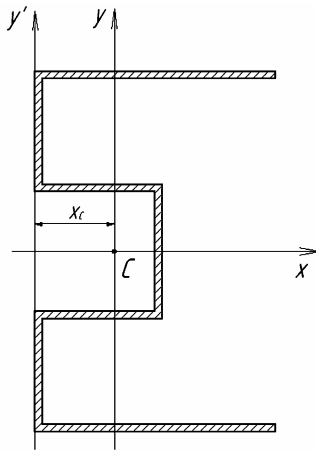


Рис. 2.3.1.2

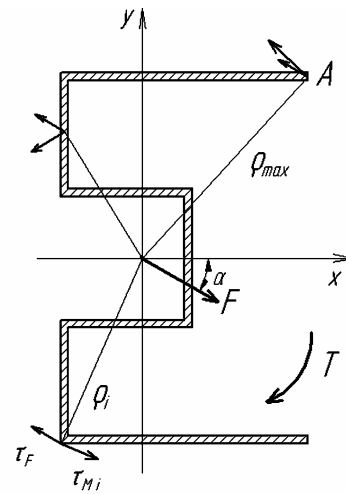


Рис. 2.3.1.3

лен плечу ρ (расстоянию до центра тяжести) и направлен перпендикулярно ему (рис. 2.3.1.3). Такая модель позволяет определить наибольшие касательные напряжения методом полярного момента, а именно

$$\tau_{M \max} = \frac{T}{W_p},$$

где $W_p = \frac{J_x + J_y}{\rho_{\max}}$ — полярный момент сопротивления, J_x и J_y — моменты инер-

ции сечения относительно соответствующих осей.

Вычислим геометрические характеристики сечения, пренебрегая членами всех высших порядков малости относительно $0,7k$, начиная с $(0,7k)^2$:

$$J_x = \frac{0,7ka^3}{12} + 2 \left[0,7ka \left(\frac{a}{2} \right)^2 \right] + 2 \left[\frac{a^3 \cdot 0,7k}{12} + a \cdot 0,7ka^2 \right] + 2 \left[0,7k \cdot 2a \left(\frac{3}{2}a \right)^2 \right],$$

$$J_x = \frac{141}{12} \cdot 0,7ka^3 = 1468750 \cdot 0,7k.$$

$$J_{y'} = 0,7ka^3 + 2 \left[\frac{0,7ka^3}{12} + 0,7ka \left(\frac{a}{2} \right)^2 \right] + 2 \left[\frac{0,7k \cdot (2a)^3}{12} + 2a \cdot 0,7ka^2 \right] =$$

$$= \frac{42}{6} \cdot 0,7ka^3,$$

$$J_y = J_{y'} - 0,7k \cdot 9a \left(\frac{2}{3}a \right)^2 = 3 \cdot 0,7ka^3 = 375000 \cdot 0,7k.$$

$$\rho_{\max} = \sqrt{\left(\frac{4}{3}a \right)^2 + \left(\frac{3}{2}a \right)^2} = 100,34 \text{ мм.}$$

Таким образом, получаем

$$\tau_{M \max} = \frac{T \rho_{\max}}{J_x + J_y} = \frac{3,67 \cdot 10^6 \cdot 100,34}{0,7k \cdot (1468750 + 375000)} = \frac{199,73}{0,7k}.$$

Наиболее нагруженной будет точка А (рис. 2.3.1.3), т. к. в этой точке угол между векторами напряжений наименьший. Следовательно, суммарное значение касательного напряжения τ_s в этой точке имеет максимальное значение (5.2.12):

$$\tau_s \equiv \tau_{sA} = \sqrt{(\tau_{M \max})^2 + (\tau_F)^2 - 2 \tau_{M \max} \tau_F \cos \theta},$$

где $\theta = 90 + \alpha + \beta$, $\beta = \text{arctg} \left(\frac{9}{8} \right)$ (рис. 2.3.1.4).

Подставляя числовые значения, получаем

$$\tau_{sA} = \sqrt{\left(\frac{199,73}{0,7k} \right)^2 + \left(\frac{44,44}{0,7k} \right)^2 + 2 \cdot \frac{199,73 \cdot 44,44}{(0,7k)^2} \cdot \sin(\alpha + \beta)} = \frac{243,25}{0,7k}.$$

Согласно 5.2.5, условие прочности сварного соединения запишется как

$$\tau_{sA} \leq \tau_a',$$

где $\tau_a' = 0,6\sigma'_{atr}$ — допускаемое значение напряжения для шва при сдвиге, $\sigma'_{atr} = \frac{\sigma_r}{n}$ — допускаемое напряжение для шва при растяжении. Если коэффициент запаса принять равным $n = 1,5$, то, согласно табл. 5.2.1, для τ_a' получаем

$$\tau_a' = 0,6\sigma'_{atr} = 0,6 \frac{\sigma_r}{n} = 0,6 \frac{400}{1,5} = 160 \text{ МПа.}$$

Из условия прочности получим значение катета сварного шва:

$$k \geq \frac{243,25}{0,7 \cdot 160} = 2,17 \text{ мм.}$$

Пересчитаем значения моментов инерции с учетом полученной величины катета сварного шва:

— относительно горизонтальной оси:

$$J_x = 1468750 \cdot 0,7k = 2,21859 \cdot 10^6 \text{ мм}^4;$$

— относительно вертикальной оси:

$$J_y = 375000 \cdot 0,7k = 566448,75 \text{ мм}^4.$$

Расчет нахлесточного сварного соединения в модуле APM Joint

Для расчета соединения в модуле APM Joint необходимо задать вид сварного шва, его геометрическую форму и внешнюю нагрузку. Результаты расчета показаны на рис. 2.3.1.5. Среди результатов можно получить: геометрические характеристики шва (площадь, координаты центра масс, моменты инерции), максимальное эквивалентное напряжение в шве и величину катета сварного шва. Помимо этого можно также вывести карту напряжений, из которой легко определяется напряжение в любой точке шва (рис. 2.3.1.6).

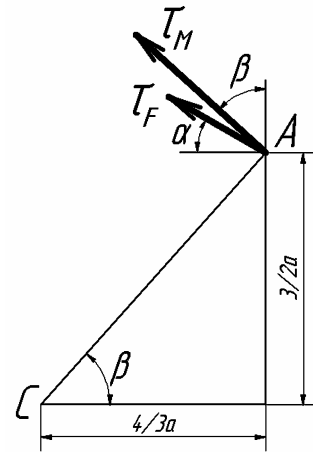


Рис. 2.3.1.4

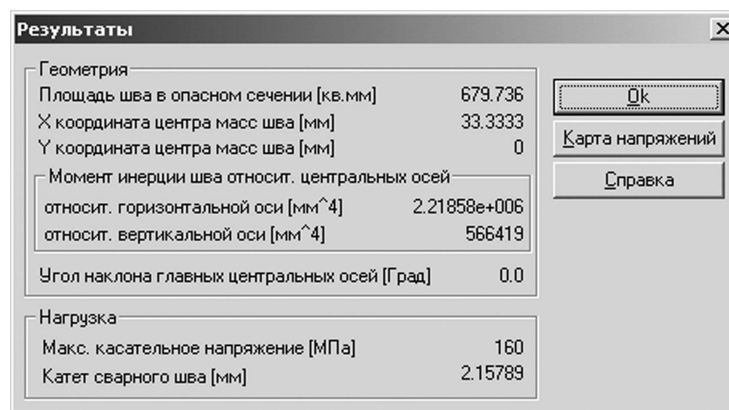


Рис. 2.3.1.5

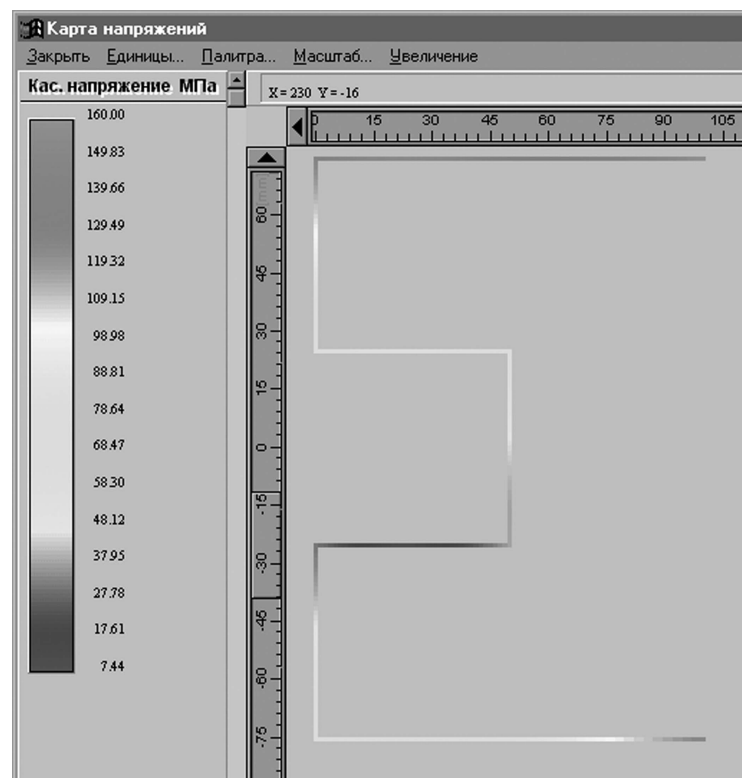


Рис. 2.3.1.6

2.3.2. Расчет таврового сварного соединения

Рассчитать тавровый сварной шов между трубой и полуфланцем (рис. 2.3.2.1, 2.1.2.1). Полуфланец нагружен постоянной силой $F = 9$ кН, действующей под углом $\alpha = 30^\circ$.

Параметры соединения: $D_1 = 300$ мм; $h = 40$ мм; $a = 10$ мм. Толщина трубы $\delta = 5$ мм.

Материал свариваемых деталей — сталь 3: $\sigma_r = 240$ МПа; $n = 2$.

Рассмотреть два варианта выполнения соединения:

- а) угловым швом (рис. 2.3.2.2);
- б) стыковым швом (рис. 2.3.2.6).

Расчет

Соединение, предназначенное для крепления полуфланца, уже было проанализировано в задаче 2.1.2, но при условии, что крепление осуществляется с помощью группового резьбового соединения (рис. 2.1.2.1).

Здесь рассматривается вариант таврового сварного соединения (рис. 2.3.2.1).

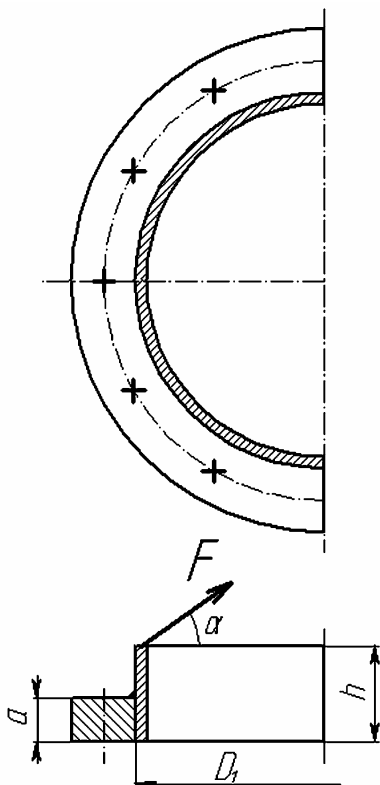


Рис. 2.3.2.1

Расчет соединения, выполненного угловым швом

Под расчетом сварного шва понимается определение его катета k из условия прочности по касательным напряжениям: касательное напряжение τ_s в наиболее нагруженной точке опасного сечения сварного шва не должно превышать допускаемое напряжение τ_a' , $\tau_s \leq \tau_a'$.

Опасное сечение сварного шва представляет собой тонкое полукольцо диаметром D_1 и толщиной $0,7k$ (рис. 2.3.2.2).

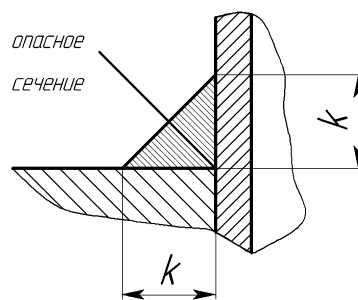


Рис. 2.3.2.2

Сначала найдем положение центра масс этого сечения C (рис. 2.3.2.3):

$$y_C = 0 \text{ — в силу симметрии; } \quad x_C = \frac{S_{y'}}{A}.$$

Для нахождения статического момента $S_{y'}$, выделяем на поверхности шва элементарный участок кольца площадью $dA = 0,5D_1 \cdot 0,7k d\varphi$ (рис. 2.3.2.4) и вычисляем $S_{y'}$ по формуле 2.3.1:

$$S_{y'} = \int_A x dA = 2 \int_0^{\pi/2} \frac{D_1^2 \cdot 0,7k \cos \varphi d\varphi}{4} = \frac{D_1^2 \cdot 0,7k}{2}$$

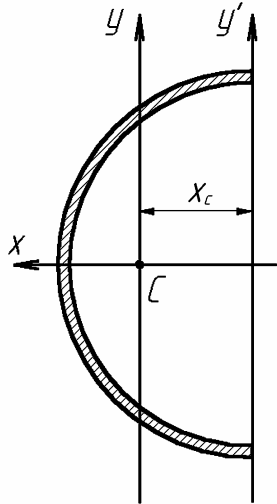


Рис. 2.3.2.3

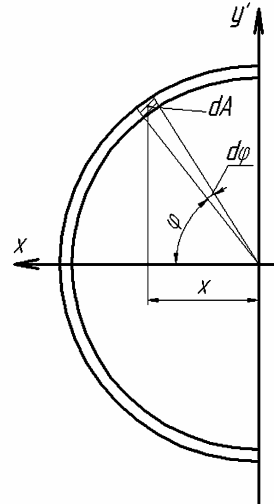


Рис. 2.3.2.4

Тогда для координаты x_C имеем

$$x_C = \frac{S_{y'}}{A} = \frac{D_1}{\pi} = 95,49 \text{ мм.}$$

Видно, что координата не зависит от величины катета сварного шва.

Далее разложим внешнюю нагрузку на составляющие и приведем их к центру масс опасного сечения:

$$F_v = F \sin \alpha = 9000 \cdot \sin 30^\circ = 4500 \text{ Н;}$$

$$F_h = F \cos \alpha = 9000 \cdot \cos 30^\circ = 7794 \text{ Н;}$$

$$M_y = F_h \cdot (h - a) + F_v \cdot \left(\frac{D_1}{2} - x_c \right) = 7794 \cdot 30 + 4500 \cdot \left(\frac{300}{2} - 95,49 \right) =$$

$$= 4,79 \cdot 10^5 \text{ Н} \cdot \text{мм}.$$

Определим величины касательных напряжений, вызываемых в опасном сечении каждым силовым фактором в отдельности

$$\tau_{F_v} = \frac{F_v}{\frac{\pi D_1}{2} \cdot 0,7k} = \frac{4500}{\frac{3,1416 \cdot 300}{2} \cdot 0,7k} = \frac{9,549}{0,7k} \text{ Н} \cdot \text{мм};$$

$$\tau_{F_h} = \frac{F_h}{\frac{\pi D_1}{2} \cdot 0,7k} = \frac{7794}{\frac{3,1416 \cdot 300}{2} \cdot 0,7k} = \frac{16,54}{0,7k} \text{ Н} \cdot \text{мм}; \quad \tau_M = \frac{M_y x}{J_y}.$$

Здесь x — расстояние от центра масс до текущей точки опасного сечения сварного шва; $J_y = J_{y'} - A \cdot x_c^2$ — момент инерции относительно центральной оси y .

Момент инерции полукольца относительно вспомогательной оси y' (рис. 2.3.2.4) равен

$$J_{y'} = \int_A x^2 dA = 2 \int_0^{\pi/2} \left(\frac{D_1}{2} \cdot \cos \varphi \right)^2 \cdot \frac{D_1}{2} \cdot 0,7k \cdot d\varphi = \frac{\pi \cdot D_1^3}{16} \cdot 0,7k.$$

Тогда

$$J_y = J_{y'} - A \cdot x_c^2 = \frac{3,1416 \cdot 300^3 \cdot 0,7k}{16} - \frac{3,1416 \cdot 300 \cdot 0,7k}{2} \cdot 95,49^2 =$$

$$= 0,7k \cdot 1,0045 \cdot 10^6 \text{ мм}^3.$$

Далее необходимо определить положение наиболее нагруженной точки. Очевидно (рис. 2.3.2.5), что самой напряженной точкой сечения будет либо точка A , либо точка B . Вычис-

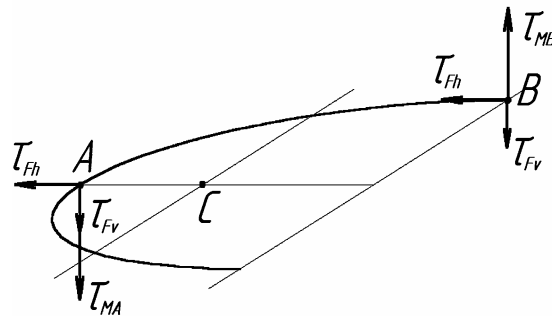


Рис. 2.3.2.5

лим суммарные касательные напряжения в каждой из этих точек и все дальнейшие расчеты будем проводить по точке с наибольшим их значением.

Вычислим суммарные касательные напряжения в каждой из этих точек и все дальнейшие расчеты будем проводить по точке с наибольшим их значением.

Найдем координаты x интересующих нас точек:

$$x_A = \frac{D_1}{2} - x_C = \frac{300}{2} - 95,49 = 54,51 \text{ мм},$$

$$x_B = x_C = 95,49 \text{ мм}.$$

Окончательно получаем:

$$\tau_{MA} = \frac{4,79 \cdot 10^5}{0,7k \cdot 1,0045 \cdot 10^6} \cdot 54,51 = \frac{26}{0,7k} \text{ МПа};$$

$$\tau_{MB} = \frac{4,79 \cdot 10^5}{0,7k \cdot 1,0045 \cdot 10^6} \cdot 95,49 = \frac{45,55}{0,7k} \text{ МПа}.$$

Суммарные напряжения:

$$\tau_{sA} = \sqrt{(\tau_{MA} + \tau_{Fv})^2 + \tau_{Fh}^2} = \frac{1}{0,7k} \sqrt{(26 + 9,549)^2 + 16,54^2} = \frac{39,21}{0,7k} \text{ МПа};$$

$$\tau_{sB} = \sqrt{(\tau_{MB} - \tau_{Fv})^2 + \tau_{Fh}^2} = \frac{1}{0,7k} \sqrt{(45,55 - 9,549)^2 + 16,54^2} = \frac{39,619}{0,7k} \text{ МПа}.$$

Таким образом, самой напряженной точкой сварного шва будет точка B .

Согласно 5.2.5, условие прочности сварного соединения в точке B запишется как

$$\tau_{sB} \leq \tau_a',$$

где τ_a' - допускаемое значение напряжения для шва при сдвиге. Так как величина допускаемого напряжения при расчете сварных соединений ниже, чем при расчете монолитных деталей, необходимо помимо всего прочего внести поправочный коэффициент, зависящий от типа сварки (табл. 5.2.1). Для углового шва

$$\tau_a' = 0,6\sigma'_{atr} = 0,6 \frac{\sigma_r}{n} = 0,6 \frac{240}{2} = 72 \text{ МПа}.$$

Из условия прочности получим значение катета сварного шва:

$$k \geq \frac{39,619}{72 \cdot 0,7} = 0,786 \text{ мм}.$$

Как правило, сварные швы имеют значения катета не ниже 1 мм. Следовательно, в данном случае принимаем $k = 1$ мм.

Расчет соединения, выполненного стыковым швом

Соединение, изображенное на рис. 2.3.2.6, называется тавровым сварным соединением стыковым швом. Расчет прочности соединений, выполненных встык, является проверочным, так как сводится к определению коэффициента запаса прочности при заданной толщине δ (в данном случае равной толщине трубы).

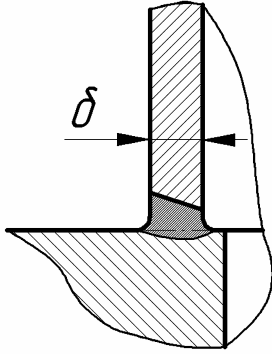


Рис. 2.3.2.6

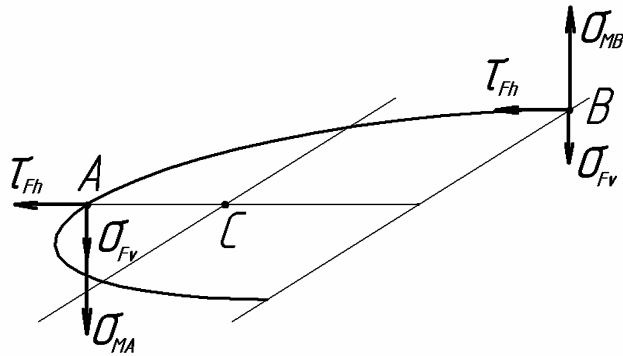


Рис. 2.3.2.7

При расчете стыкового шва, так же, как и углового, сначала определяется положение центра тяжести геометрической фигуры, образованной сварным швом. Поскольку конфигурация сварного шва в опасном сечении такая же, как и углового шва, то координаты центра тяжести у этих швов одинаковые. По этой же причине здесь можно использовать полученные для углового шва выражения моменты инерции, если вместо толщины $0,7k$ взять δ , а именно

$$J_y = J_{y'} - A \cdot x_C^2 = \frac{3,1416 \cdot 300^3 \cdot 5}{16} - \frac{3,1416 \cdot 300 \cdot 5}{2} \cdot 95,49^2 = 5,022 \cdot 10^6 \text{ мм}^4.$$

Эквивалентные напряжения для точек A и B , согласно энергетической теории, можно записать следующим образом (рис.2.3.2.7):

$$\sigma_{eA} = \sqrt{(\sigma_{MA} + \sigma_{Fv})^2 + 3\tau_{Fh}^2},$$

$$\sigma_{eB} = \sqrt{(\sigma_{MB} - \sigma_{Fv})^2 + 3\tau_{Fh}^2},$$

где

$$\tau_{Fh} = \frac{2F_h}{\pi D_1 \delta} = \frac{2 \cdot 7794}{3,1416 \cdot 300 \cdot 5} = 3,308 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{Fv} = \frac{2F_v}{\pi D_1 \delta} = \frac{2 \cdot 4500}{3,1416 \cdot 300 \cdot 5} = 1,91 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{MA} = \frac{M_y x_A}{J_y} = \frac{479122 \cdot 54,51}{5,022 \cdot 10^6} = 5,201 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{MB} = \frac{M_y x_B}{J_y} = \frac{479122 \cdot 95,49}{5,022 \cdot 10^6} = 9,11 \text{ МПа}.$$

Подставляя числовые значения, получаем величины эквивалентных напряжений:

$$\sigma_{eA} = \sqrt{(\sigma_{MA} + \sigma_{Fv})^2 + 3\tau_{Fh}^2} = \sqrt{(5,201 + 1,91)^2 + 3 \cdot 3,308^2} = 9,132 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{eB} = \sqrt{(\sigma_{MB} + \sigma_{Fv})^2 - 3\tau_{Fh}^2} = \sqrt{(9,11 + 1,91)^2 - 3 \cdot 3,308^2} = 9,413 \text{ МПа},$$

Как и в предыдущем случае, самая нагруженная точка сварного шва — точка *B*. Определим величину коэффициента запаса по пределу текучести:

$$n = \frac{\sigma_r}{\sigma_{eB}} = \frac{240}{9,413} = 25,497.$$

Расчет углового сварного соединения в модуле APM Joint

Для расчета сварного соединения в модуле APM Joint необходимо задать тип сварного шва, его геометрическую форму и действующие на него внешние силы, а также указать предел текучести материала и коэффициент запаса текучести (окно «**Постоянные параметры**»).

Результатами расчета являются: геометрические характеристики шва (площадь шва, координаты центра масс и др.), максимальное напряжение в сварном шве и минимальная величина катета сварного шва (рис. 2.3.2.8). Помимо этого можно по-

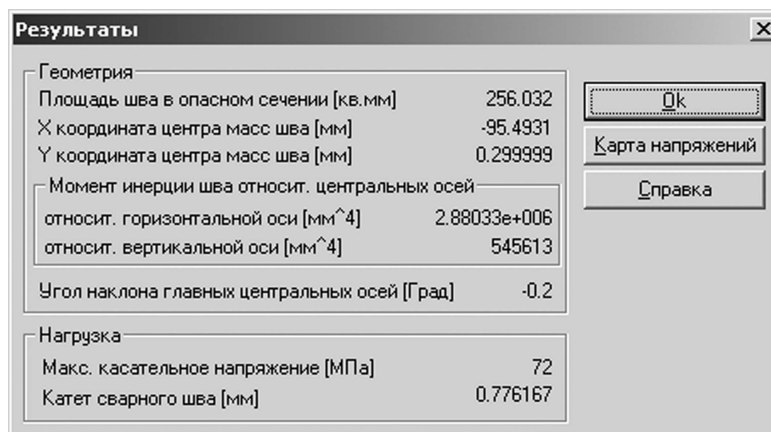


Рис. 2.3.2.8

лучить карту распределения напряжений по длине шва (на рис. 2.3.2.9 представлен лишь фрагмент окна).

Расчет стыкового сварного соединения в модуле АРМ Joint аналогичен расчету соединения угловым швом. Результаты такого расчета показаны на рис. 2.3.2.10.

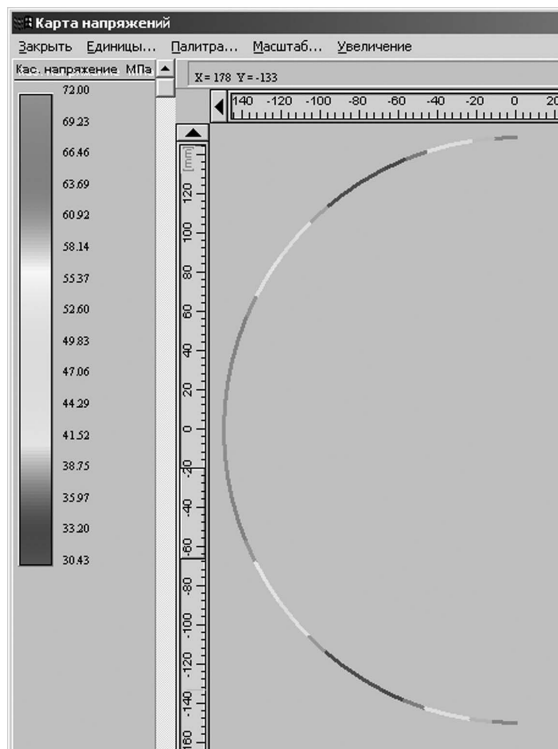


Рис. 2.3.2.9

Геометрия	
Площадь стыка [кв.мм]	2356.3
X координата центра масс стыка [мм]	-95.4935
Y координата центра масс стыка [мм]	-0.00708871
Момент инерции стыка относит. центральных осей	
относит. горизонтальной оси [мм ⁴]	2.65178e+007
относит. вертикальной оси [мм ⁴]	5.02671e+006
Угол наклона главных центральных осей [Град]	0.0
Нагрузка	
Макс. нормальное эквивалентное напряжение [МПа]	9.2861
Кэффициент запаса по пределу прочности	43.0752
Кэффициент запаса по пределу текучести	25.8451

Рис. 2.3.2.10