

УДК 539.214

В. И. Онофриенко, Е. И. Шевцов, А. А. Макаренко

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ШИРИНЫ ПЛОЩАДКИ ОБЖАТИЯ ПРОКЛАДКИ ФЛАНЦЕВЫХ СОЕДИНЕНИЙ СФЕРИЧЕСКОГО ТИПА

Предложена методика определения ширины площадки обжатия металлической прокладки фланцевого соединения сферического типа по заданному усилию затяжки стыка с учетом его геометрии и механических свойств материала прокладки.

Запропоновано методику визначення ширини площини обтиснення металевої прокладки фланцевого з'єднання сферичного типу за заданим зусиллям затягання стику з урахуванням його геометрії та механічних властивостей матеріалу прокладки.

The technique is proposed to determine width of the spherical-type flange coupling's metal gasket clamping area by the specified joint tightening force considering the joint geometry and mechanical properties of the gasket material.

Необходимость определения ширины площадки обжатия металлической прокладки по заданному усилию затяжки стыка не является самоцелью, а обусловлена потребностями расчета герметичности и прочности элементов фланцевых соединений сферического типа, широко используемых в конструкции стыков магистралей горючего и окислителя разработки нашей организации.

Целью настоящей статьи является определение зависимости ширины площадки обжатия металлической прокладки из легкодеформируемого сплава, установленной между корпусом и фланцем соединения сферического типа (рис. 1), от суммарного усилия затяжки стыка.

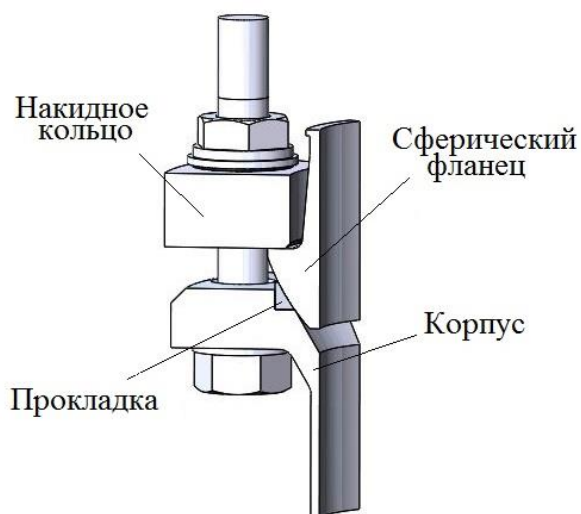


Рис. 1. Фрагмент фланцевого соединения сферического типа

Основные допущения, принятые при установлении искомой зависимости:

1. Доля упругой деформации фланца и прокладки в общей деформации на участке их контактного взаимодействия является незначительной и поэтому не принимается в расчет.

2. Значение среднего нормального давления на прокладку q^* соответствует равновесному положению системы фланец-прокладка, т. е. является некоторой постоянной, характеризующей среднее предельное давление начала пластического течения в прокладке.

Указанное допущение не противоречит тем, которые принимаются в задачах определения предельных нагрузок начала пластического течения в случае плоской деформации в рамках модели жестко-пластического тела [1].

3. По поверхности контакта фланца с прокладкой действуют касательные напряжения τ^* , достигающие наибольшего значения, соответствующего пределу текучести материала прокладки при сдвиге: $\tau^* = \tau_T$.

Указанное допущение также является общепринятым в технологических задачах теории пластичности, в которых либо пренебрегают трением по поверхности вдавливаемого штампа, либо принимают его равным пределу текучести при сдвиге. В нашем случае принимаем второй вариант, поскольку по результатам экспериментов на поверхности сферического фланца

остаются четкие следы от контакта с прокладкой, хотя перед затяжкой стыка на прокладку наносится смазка.

4. В качестве предела текучести при сдвиге принимается его значение по Мизесу (σ_T – предел текучести материала прокладки)

$$\tau_T = \frac{\sigma_T}{\sqrt{3}}, \quad (1)$$

поскольку указанная зависимость принимается в задачах плоской деформации, а в силу осевой симметрии задачи характер деформации близок к плоской.

5. Выдавленная в результате обжатия часть материала прокладки не принимается в расчет при определении ширины площадки контакта ввиду того, что выступающая над исходной поверхностью прокладки выдавленная ее часть будет развальцовываться, а необходимые для этого напряжения по поверхности контакта существенно меньшие, чем для выдавливания. Уравнение равновесия для элементарного участка выступающей части прокладки высотой dx имеет следующий вид:

$$q \cdot dx = b \cdot d\tau + \sigma b \cdot \frac{dx}{R}, \quad (2)$$

где q – среднее давление на выступающую часть прокладки со стороны фланца;

R – радиус сферической поверхности фланца;

b – ширина выступающей части прокладки.

Интегрируя (2) по высоте выступающей части прокладки a , получим

$$q = \tau \frac{b}{a} + \sigma \frac{b}{R}.$$

Поскольку $R \gg a$, второе слагаемое в правой части полученного выражения существенно меньше первого. Поэтому с учетом (1) для q справедлива следующая оценка:

$$q = \frac{\sigma_T b}{\sqrt{3} \cdot a}.$$

Поскольку $a \approx b$, значение $q < \sigma_T$, тогда как из условия герметичности необходимо выполнение условия

$$q > 11 \text{ кгс/мм}^2 \approx 3\sigma_T.$$

Как показывают результаты эксперимента, характер деформации выступающей части прокладки имеет все признаки пластического сдвига.

С учетом принятых допущений, а также располагая данными по форме обжатой прокладки для конкретного значения суммарного усилия затяжки стыка P , полученными в результате испытаний, найдем предельное значение среднего нормального давления q^* по площадке контакта из уравнения равновесия системы фланец-прокладка

$$\int_F (-q^* \cdot \bar{n} + \tau^* \cdot \bar{t}) \cdot \bar{i} \cdot dF + P = 0,$$

где \bar{n} – единичный вектор нормали к поверхности фланца;
 \bar{t} – единичный вектор касательной к поверхности фланца;
 \bar{i} – единичный вектор, направленный вдоль продольной оси стыка;

F – площадь контактной поверхности;

$P = F_{\text{зат}} \cdot n_b$ – суммарное осевое усилие на прокладке,

где $F_{\text{зат}}$ – усилие натяжения болта;

n_b – количество болтов в стыке.

В силу осевой симметрии стыка геометрическое место точек поверхности фланца в произвольной плоскости, проходящей через ось стыка, определяется уравнением

$$\bar{r} = R (\cos \alpha \cdot \bar{i} + \sin \alpha \cdot \bar{j}),$$

единичные векторы нормали и касательной к указанной поверхности –

$$\bar{n} = \frac{\bar{r}}{|\bar{r}|} = \cos \alpha \cdot \bar{i} + \sin \alpha \cdot \bar{j};$$

$$\bar{t} = -\sin \alpha \cdot \bar{i} + \cos \alpha \cdot \bar{j}.$$

С учетом последнего уравнение равновесия примет вид

$$P = \int_0^{2\pi} \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} (q^* \cdot \cos \alpha + \tau^* \cdot \sin \alpha) \cdot R^2 \cdot d\alpha \cdot d\varphi.$$

Выполнив интегрирование, получим зависимость

$$q^* = \frac{P}{2\pi R^2} - \frac{\tau_T(\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2)}{\sin \alpha_2 - \sin \alpha_1}. \quad (3)$$

Углы α_1 и α_2 определим из формы деформированной прокладки стыка 11р, соответствующей его затяжке моментами на болтах $M = 2,75$ кгс·м (рис. 2) по формулам

$$\alpha_1 = \arcsin\left(\frac{d_{пв}}{2R}\right);$$

$$\alpha_2 = \arccos\left(\cos \alpha_1 + \frac{h_1 - h_{п}}{R}\right).$$

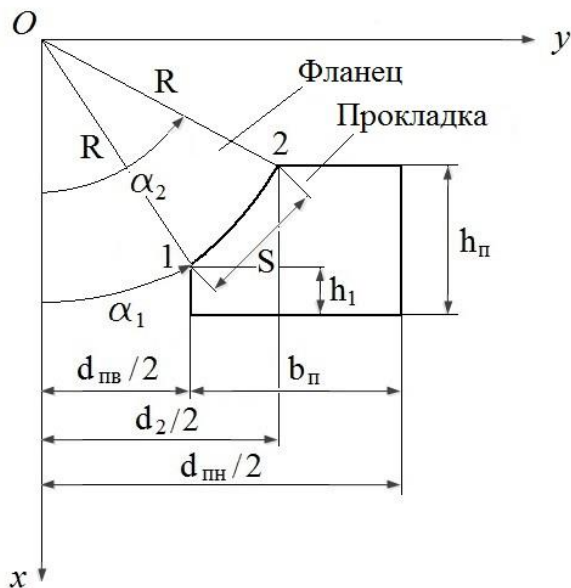


Рис. 2. Геометрия поперечного сечения обжатой прокладки

Исходные данные для расчета в соответствии с геометрией стыка 11р приведены в табл. 1.

Таблица 1

Исходные данные для расчета среднего предельного давления q^*

Параметр	Значение
Усилие натяжения болта ($M=2,75$ кгс·м) $F_{зат}$, кгс	1273
Количество болтов $n_б$, шт.	10
Радиус скругления опорной поверхности сферического фланца R , мм	43
Внутренний диаметр прокладки $d_{пв}$, мм	70

Высота прокладки $h_{п}$, мм	4
Высота обжатой прокладки по внутреннему диаметру h_1 , мм	0,8
Предел текучести материала прокладки (алюминиевый сплав АД1.М) σ_T , кгс/мм ²	4

Результаты расчета приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты расчета среднего предельного давления q^*

Параметр	Значение
Предел текучести материала прокладки (алюминиевый сплав АД1.М) при сдвиге τ_T , кгс/мм ²	2,31
Угловое положение нижнего края площадки контакта на прокладке α_1 , рад	0,9509
Угловое положение верхнего края площадки контакта на прокладке α_2 , рад	1,03967
Среднее предельное нормальное давление по площадке контакта сферического фланца с прокладкой q^* , кгс/мм ²	19,14

Имея предельное значение среднего нормального давления q^* для состояния равновесия системы сферический фланец – прокладка, мы можем утверждать, что при средних нормальных давлениях, когда $q > q^*$, прокладка течет. При этом площадь контакта фланца с прокладкой увеличивается, что приводит к уменьшению q .

Когда q достигает значения q^* , наступает равновесное состояние системы. С учетом этого для определения зависимости ширины площадки контакта S от суммарного усилия затяжки стыка P представим (3) в виде

$$P = 2\pi R^2 (q^* (\sin \alpha_2 - \sin \alpha_1) + \tau_T (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2))$$

Углы α_1 и α_2 должны соответствовать взаимному положению фланца и прокладки по мере ее обжатия.

Для определения зависимости ширины площадки контакта S от значения обжатия прокладки рассмотрим геометрию системы сферический фланец – прокладка в двух положениях, соответствующих разной степени обжатия прокладки.

Введем неподвижную систему координат Oxy (рис. 3) с началом в центре сферической

поверхности фланца в состоянии начального контакта (прокладка не обжата).

Обозначим через Δ осадку фланца по мере обжатия прокладки. При осадке Δ точки на поверхности фланца будут удовлетворять уравнению

$$(x - \Delta)^2 + y^2 = R^2.$$

Ширину площадки контакта определим по формуле

$$S = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}.$$

Очевидно, что координата точки 1 по оси Oy будет оставаться постоянной в процессе обжатия прокладки:

$$y_1 = d_{пв} / 2.$$

Координата точки 1 по оси Ox

$$x_1 = \Delta + \sqrt{R^2 - y_1^2}.$$

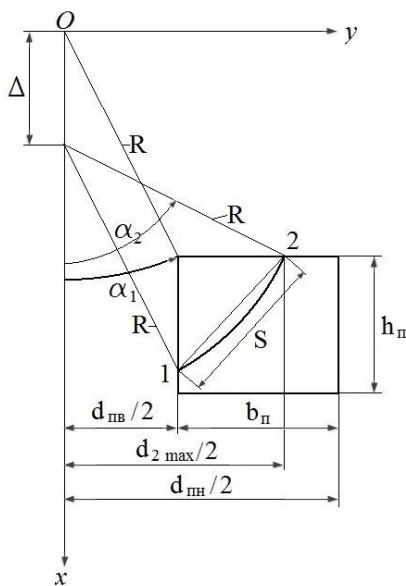


Рис. 3. Изменение геометрии поперечного сечения прокладки в результате осадки сферического фланца

Координаты точки 2 в процессе обжатия

$$\begin{aligned} x_2 &= x_1 - \Delta; \\ y_2 &= \sqrt{R^2 - (x_2 - \Delta)^2}. \end{aligned}$$

Угловое положение точек 1 и 2

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \arcsin(y_1/R); \\ \alpha_2 &= \arcsin(y_2/R). \end{aligned}$$

Приведенные выше соотношения позволяют получить в явном виде искомую зависимость $S = f(P)$, однако ввиду громоздкости указанной зависимости проще представить ее в параметрическом виде:

$$\begin{cases} S = f_1(\Delta); \\ P = f_2(\Delta). \end{cases}$$

Исключив из выражений для P и S переменные $x_1, y_1, x_2, y_2, \alpha_1$ и α_2 , получим

$$\begin{cases} S = \sqrt{\Delta^2 + (d_{пв}/2 - Z)^2}; \\ P = 2\pi R(q^*(Z - d_{пв}/2) + \tau_T \Delta); \\ Z = \sqrt{R^2 - (\sqrt{R^2 - d_{пв}^2/4} - \Delta)^2}. \end{cases} \quad (4)$$

Задавая в (4) значения Δ в диапазоне $0 \leq \Delta \leq h_{п}$, получим соответствующие ему значения S и P .

Результаты расчета для исходных данных, заданных в табл. 1, приведены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты расчета зависимости S и P от Δ по формулам (4)

Δ , мм	S , мм	P , кгс
0,1	0,12	430
0,5	0,61	2129
1	1,22	4205
1,5	1,82	6227
2	2,41	8199
2,5	3,00	10121
3	3,58	11994
3,2	3,81	12730
3,5	4,16	13820
4	4,74	15600

Графически представлена полученная зависимость на рис. 4.

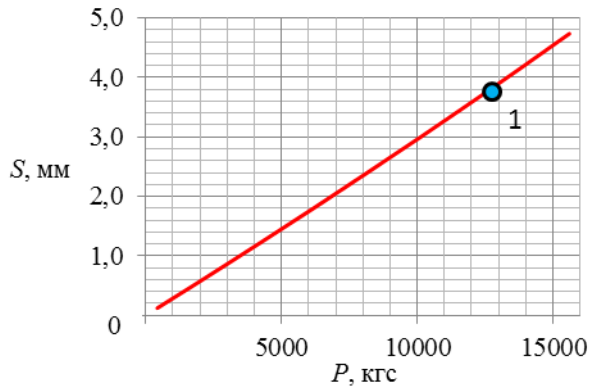


Рис. 4. Зависимость ширины площадки контакта сферического фланца с прокладкой от суммарного усилия затяжки стыка 11р (точка 1 соответствует результатам испытаний)

Из рис. 4 видно, что зависимость $S = f(P)$ является практически линейной.

Такой же характер имеет и зависимость $S = f_1(\Delta)$ ширины обжатия прокладки от осадки сферического фланца (рис. 5).

Ввиду линейности зависимости и того, что начальная $(0, 0)$ и конечная $(h_{п}, S_{\max})$ ее точки определяются только геометрией, аналитически она может быть представлена в следующем виде:

$$S = A \cdot \Delta, \quad (5)$$

где $A = \frac{S_{\max}}{h_{п}};$

$$S_{\max} = 2R \cdot \sin\left(\frac{\alpha_{2\max} - \alpha_1}{2}\right);$$

$$\alpha_1 = \arcsin\left(\frac{d_{пв}}{2R}\right); \quad (6)$$

$$\alpha_{2\max} = \arccos(\cos \alpha_1 - h_{п}/R). \quad (7)$$

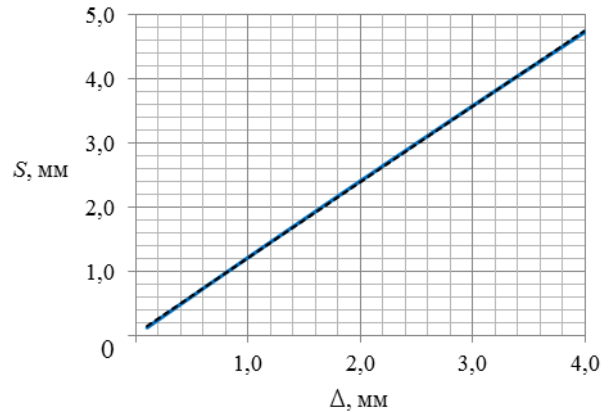


Рис. 5. Зависимость ширины площадки контакта сферического фланца с прокладкой от осадки фланца

В частности, для стыка 11р $A=1,184$. Из первого уравнения (4) следует

$$Z - d_{пв}/2 = \sqrt{S^2 - \Delta^2}.$$

Тогда второе уравнение в (4) можно представить в следующем виде:

$$P = 2\pi R \left(q^* \sqrt{S^2 - \Delta^2} + \tau_T \Delta \right)$$

или с учетом (5)

$$P = 2\pi R \left(q^* \sqrt{A^2 - 1} + \tau_T \right) \cdot \frac{S}{A}.$$

В результате искомая зависимость $S=f(P)$ приобретает вид

$$S = BP, \quad (8)$$

где $B = \frac{A}{2\pi R \left(q^* \sqrt{A^2 - 1} + \tau_T \right)}. \quad (9)$

Таким образом, для определения зависимости ширины площадки обжатия прокладки S от усилия затяжки стыка P необходимо задать геометрию и механические свойства материала прокладки.

Неопределенным является только нормальное давление q^* по площадке контакта сферического фланца с прокладкой, входящее в формулу (9).

Полученное выше (табл. 2) значение $q^* = 19,14 \text{ кгс/мм}^2$ значительно выше предела текучести $\sigma_T = 4 \text{ кгс/мм}^2$ и временного сопротивления $\sigma_b = 8 \text{ кгс/мм}^2$ для сплава АД1.М, из которого изготовлена прокладка стыка 11р. Наиболее близким к найденному

является значение твердости по Бринеллю $HB = 25$ кгс/мм² для АД1.М.

Известно, что величина HB определяется как отношение нагрузки P , действующей на индентор (шарик из сплава с высокой твердостью), к площади шаровой поверхности отпечатка, полученного при его вдавливании в испытуемый материал:

$$HB = \frac{2P}{\pi D^2 \left(1 - \sqrt{1 - (d/D)^2}\right)},$$

где D – диаметр индентора;

d – диаметр отпечатка.

Считая HB константой материала, из приведенной зависимости можно легко определить d с учетом P .

Обозначим через P_1 нагрузку, при которой диаметр отпечатка равен $d_{пв}$, а через P_2 – нагрузку, при которой $d > d_{пв}$.

Тогда приращению нагрузки

$$P = P_2 - P_1$$

будет соответствовать увеличению диаметра отпечатка

$$d = D \sqrt{1 - \left(\sqrt{1 - \left(\frac{d_{пв}}{D}\right)^2} - \frac{2P}{\pi D^2 HB} \right)^2}.$$

Зная d , ширину площадки контакта S можно определить по формуле

$$S = D \cdot \sin\left(\frac{\alpha_2 - \alpha_1}{2}\right),$$

где $\alpha_1 = \arcsin(d_{пв}/D)$;

$$\alpha_2 = \arcsin(d/D).$$

В ходе испытаний стыка 11р магистрали циркуляции РН «Антарес» для $D = 86$ мм, $d_{пв} = 70$ мм и $P = 12730$ кгс полная ширина площадки обжатия прокладки $S_{ф}$ составила 4,58 мм при глубине внедрения $\Delta = 3,86$ мм.

Чтобы обеспечить указанную ширину площадки обжатия в соответствии с приведенной выше зависимостью, необходимо принять $HB = 12,2$ кгс/мм².

Полученное несоответствие связано с тем, что определение HB является регламентированным, т.е. для получения одина-

ковых значений HB необходимо выполнение условий геометрического подобия, а именно постоянство отношений P/D^2 и d/D .

Так, для шарика диаметром $D = 10$ мм при определении твердости алюминиевых сплавов в соответствии с ГОСТ 9012-59 принимается $P/D^2 = 5$, а соответствующее ему отношение $d/D = 0,5$. В нашем же случае $P/D^2 = 1,7$, а $d/D = 0,87$, т.е. условия подобия не соблюдаются.

С другой стороны, если рассматривать HB как некоторое усредненное давление, то по определению оно направлено по нормали к горизонтальной плоскости.

Спроектируем на продольную ось стыка напряжения, действующие на фланец со стороны прокладки в соответствии с принятыми выше предположениями:

$$p = q^* \cos \alpha_{cp} + \tau_T \sin \alpha_{cp}, \quad (10)$$

где $\alpha_{cp} = (\alpha_1 + \alpha_2)/2$.

Для стыка 11р диапазону возможных значений $\alpha_{cp} = \{0,9509; 1,006\}$ соответствует диапазон значений $p = \{11,53; 12,35\}$.

Полученное значение практически совпадает с вычисленным выше значением HB .

Обратим внимание на то, что в методах неразрушающего контроля механических свойств материалов конструкций [2] используется соответствие между твердостью и временным сопротивлением, которое имеет вид

$$\sigma_B = c \cdot HB,$$

где $c = 0,326$ для широкого класса алюминиевых сплавов (для медных – $c = 0,36$).

Аналогичное соотношение имеет место и для предела текучести

$$\sigma_T = c \cdot HB_{0,2}, \quad (11)$$

где $HB_{0,2}$ – показатель механических свойств материала, называемый твердостью на пределе текучести.

В частности, значению $\sigma_T = 4$ кгс/мм² (для алюминиевого сплава АД1.М) должно соответствовать $HB_{0,2} = 12,27$ кгс/мм².

Если полученное совпадение не является случайным, то полагая из (10), что $p = HB_{0,2}$, величину q^* можно определить по формуле

$$q^* = \frac{\sigma_T}{c \cdot \cos \alpha_{cp}} \cdot \left(1 - \frac{c}{\sqrt{3}} \cdot \sin \alpha_{cp} \right), \quad (12)$$

в которой $\alpha_{cp} = (\alpha_1 + \alpha_{2max})/2$, а значения α_1 и α_{2max} определяются по формулам (6) и (7) соответственно.

Зависимость (12) требует экспериментальной проверки, но очевидно, что в случае справедливости допущения, принятого в пункте 2, способ определения q^* может быть обобщен для использования на прокладках, изготовленных из других материалов.

Деформированные формы поперечных сечений прокладок, полученные в результате затяжки указанных стыков моментами 6,5 кгс·м, показаны на рис. 6.

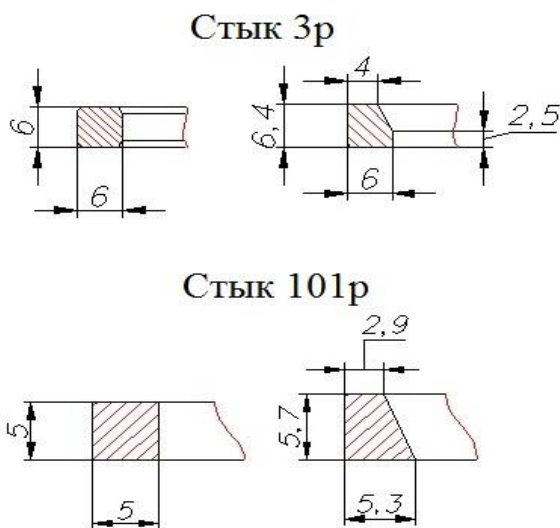


Рис. 6. Формы поперечных сечений прокладок стыков 3р и 101р до и после обжатия

Исходные данные и результаты расчета сведены в табл. 4.

Таблица 4

Расчет ширины площадки обжатия прокладки с учетом условий испытаний

Параметр	Номер стыка	
	3р	101р
Номинальное усилие натяжения болта $F_{зат}$, кгс	3200	2790
Количество болтов n_b , шт.	30	10
Радиус скругления опорной поверхности сферического фланца R , мм	158	80
Внутренний диаметр прокладки $d_{пв}$, мм	274	140
Высота прокладки $h_{п}$, мм	6	5

Высота обжатой прокладки по внутреннему диаметру h_1 , мм	2,5	0,7
Материал прокладки	М3	АД1.М
Предел текучести материала прокладки σ_T , кгс/мм ²	9	4
Предел текучести материала прокладки при сдвиге τ_T , кгс/мм ²	5,2	2,31
Угловое положение нижнего края площадки контакта на прокладке α_1 , рад	1,0493	1,0654
Угловое положение верхнего края площадки контакта на прокладке α_{2max} , рад	1,0926	1,136
Коэффициент c в формуле (11)	0,36	0,236
Среднее предельное нормальное давление по площадке контакта сферического фланца с прокладкой q^* , кгс/мм ²	42,65	22,53
Максимально возможная ширина площадки контакта в пределах исходной высоты прокладки S_{max} , мм	6,84	5,61
Коэффициент в формуле (5) A	1,1394	1,122
Коэффициент в формуле (8) B , мм/кгс	$4 \cdot 10^{-5}$	$16 \cdot 10^{-5}$
Расчетное значение минимальной ширины площадки S , мм	3,87	4,52
Фактическое значение минимальной ширины площадки $S_{ф}$, мм	3,9	4,7

Значения $S_{ф}$ в табл. 4 получены прочерчиванием деформированных форм прокладок, показанных на рис. 6.

Таким образом, с учетом принятых допущений получена линейная зависимость (8) ширины площадки обжатия металлической прокладки фланцевого соединения сферического типа от значения суммарного усилия затяжки стыка, которая определяется параметрами геометрии стыка и механическими свойствами материала прокладки.

Список использованной литературы

1. Качанов Л. М. Основы теории пластичности. – М.: Наука, 1969.
2. Теплоэнергетика и теплотехника: общие вопросы: Справочник / Под общ. ред. чл.-кор. АН СССР В. А. Григорьева, В. М. Зорина. – 2-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1987.
3. Технический отчет по результатам испытаний ОК 02.2826.0000.0000.00.0, 2TRS2S1.21.16971.219 ОТ. – Днепропетровск: ГП «КБ «Южное», 2010.

Статья поступила 22.05.2017