

РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ТАВРОВЫХ И НАХЛЕСТОЧНЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ С ЛОБОВЫМИ ШВАМИ С УЧЕТОМ КОНЦЕНТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ

Е.А. Усманова

ESTIMATION OF BEARING ABILITY OF T-SHAPED AND LAP WELDED CONNECTIONS WITH FRONT SEAMS TAKING INTO ACCOUNT STRESS CONCENTRATION

E.A. Usmanova

Рассмотрена расчетная оценка несущей способности тавровых и нахлесточных сварных соединений закладных деталей арматуры железобетона с учетом концентрации напряжений в зависимости от конструктивно-геометрических параметров угловых швов.

Ключевые слова: угловые швы, сварные соединения, прочность, концентрация напряжений.

The paper considers the estimation of bearing ability of angular welded connections of mortgage details of armature of ferro-concrete taking into account stress concentration depending on is constructive-geometrical parameters of angular seams.

Keywords: angular seams, welded connections, durability, stress concentration.

В процессе эксплуатации тавровых и нахлесточных сварных соединений образуются трещины в месте перехода от шва к основному металлу, так как наблюдается значительная концентрации напряжений. В работе рассмотрена расчетная оценка несущей способности тавровых и нахлесточных сварных соединений закладных деталей арматуры железобетона с учетом концентрации напряжений в зависимости от конструктивно-геометрических параметров угловых швов: радиуса R перехода от шва к основному металлу, угла перехода φ , лобового катета и толщины b присоединяемого элемента [1–5].

Для рассматриваемых сварных соединений необходимо определить коэффициент concentra-

ции напряжений α_σ , который определяется по формуле [4]

$$\alpha_\sigma = 1 + \frac{\alpha}{\sqrt{R/b}} \sin \varphi. \quad (1)$$

Здесь α – коэффициент, который зависит от соотношения b/B . Если соотношение $b/B \leq 3$, то

$$\alpha = \sqrt{\frac{(B/b) - 1}{(B/b)^2 + 1,6}}$$

R – радиус перехода от шва к основному металлу; φ – угол наклона касательной к усилению шва; b – толщина пластины; B – максимальная ширина усиления в центральном сечении (рис. 1). Если соотношение $b/B > 3$, значение коэффициента α принимать как при $b/B = 3$ [4].

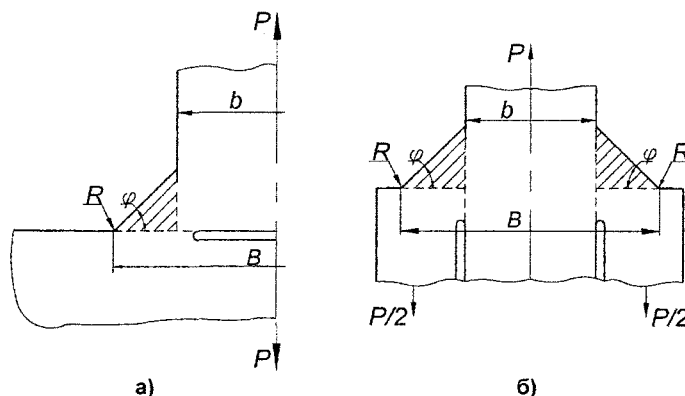


Рис. 1. Расчетная схема таврового сварного соединения (а), нахлесточного сварного соединения (б)

Коэффициенты концентрации напряжений α_σ , рассчитанные по формуле (1), характерны для идеально упругой работы сварных тавровых и нахлесточных соединений с лобовыми швами. В действительности в области концентрации напряжений имеет место упругопластическое состояние материала, которое, в свою очередь, характеризуется коэффициентами концентрации напряжений K_σ и коэффициентами концентрации деформаций K_ε . Для оценки упругопластического состояния материала в области концентрации напряжений воспользуемся подходом Нейбера [6]. При этом в соответствии с принципом минимума энергии полагается, что произведение коэффициента концентрации напряжений α_σ и коэффициента концентрации деформаций α_ε в упругой области деформирования равно произведению коэффициента концентрации напряжений K_σ и коэффициента концентрации деформаций K_ε в упругопластической области деформирования для реального материала, который имеет свою диаграмму растяжения, отличную от идеально упругой диаграммы.

С учетом того, что в идеально упругом материале коэффициенты концентраций напряжений и деформаций равны ($\alpha_\sigma = \alpha_\varepsilon$) и не зависят от величины номинальных напряжений [6], уравнение Нейбера можно представить следующим образом:

$$K_\sigma K_\varepsilon = \alpha_\sigma^2. \quad (2)$$

С учетом закона Гука и того, что $K_\sigma = \sigma^{\max} / \sigma_H$; $K_\varepsilon = \varepsilon^{\max} / \varepsilon_H$, можно записать:

$$\sigma^{\max} \varepsilon^{\max} = \sigma_{\text{упр}}^{\max} \varepsilon_{\text{упр}}^{\max} = \sigma_H^2 \alpha_\sigma^2 / E = \text{const}, \quad (3)$$

где σ^{\max} , ε^{\max} – максимальные напряжения и деформации в зоне концентратора в упругопластической области деформирования для реального материала; $\sigma_{\text{упр}}^{\max}$, $\varepsilon_{\text{упр}}^{\max}$ – максимальные напряжения и деформации в зоне концентратора в упругой области для идеально упругого материала; σ_H – номинальные напряжения, приложенные к сварному соединению; E – модуль упругости стали.

Таким образом, при фиксированных значениях номинальных напряжений σ_H и уровня концентрации напряжений в зоне перехода от усиления шва к основному металлу α_σ произведение максимальных деформаций на максимальные напряжения в упругой и упругопластической области деформирования есть величина постоянная. В данном случае зависимость представляет собой гиперболу $\sigma^{\max} = \text{const} / \varepsilon^{\max}$, рассматривая которую совместно с кривой деформационного упрочнения арматурной стали $\sigma = f(\varepsilon)$, можно определить максимальные упругопластические деформации для металла в зоне концентрации напряжений. На рис. 2 показана процедура нахождения максимальных

упругопластических деформаций (точка A_1) по заранее известному упругому решению (точка A). Для этого по известным конструктивно геометрическим параметрам по формуле (1) находим коэффициент концентрации напряжений α_σ в упругой области. В соответствии с заданными техническими условиями задаем номинальные напряжения, действующие на сварное соединение σ_H , и находим точку A ($\sigma_{\text{упр}}^{\max} = \alpha_\sigma \sigma_H$). В дальнейшем задача сводится к нахождению максимальных упругопластических деформаций ε^{\max} , характеризующих положение точки A_1 на реальной диаграмме деформирования металла сварного соединения. Данную диаграмму в пластической области удобнее всего аппроксимировать следующей функцией:

$$\sigma_i = \sigma_T (\varepsilon_i / \varepsilon_T)^m, \quad (4)$$

где σ_i , ε_i – интенсивности напряжений и деформаций соответственно; σ_T , ε_T – предел текучести и соответствующая ему деформация ($\varepsilon_T = \sigma_T / E$); m – показатель упрочнения материала при пластическом деформировании (для стали 15ХСНД по экспериментальным данным $m = 0,075$). При совместном решении уравнений (3) и (4), полагая, что $\sigma_i = \sigma^{\max}$, а $\varepsilon_i = \varepsilon^{\max}$, получаем:

$$\varepsilon^{\max} = \left[\frac{\sigma_H^2 \alpha_\sigma^2 \varepsilon_T^m}{E \sigma_T} \right]^{1/(1+m)} \quad (5)$$

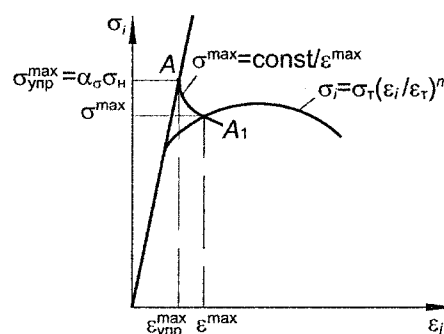


Рис. 2. Процедура нахождения максимальных упругопластических деформаций ε^{\max} по известному значению α_σ и σ_H

Для оценки момента разрушения в зоне повышенной концентрации напряжений по уровню максимальных упругопластических деформаций необходимо воспользоваться деформационным критерием разрушения. Согласно феноменологической теории разрушения, таким критерием является предельная пластичность материала L_p (или ресурс пластичности), за которую принята предельная интенсивности деформации сдвига и которая связана с максимальной предельной деформацией $\varepsilon_{\text{пр}}^{\max}$ соотношением $L_p = \varepsilon_{\text{пр}}^{\max} / \sqrt{3}$. Разрушение наступает при достижении текущей деформации сдвига L предельного значения L_p

($L_p = L_p$) [7]. В общем случае для одинаковых температурно-скоростных условий деформирования L_p определяется показателем напряженного состояния Π , который представляет отношение гидростатического давления σ_0 к интенсивности касательных напряжений T ($\Pi = \sigma_0/T$) [7]. Каждому значению показателя напряженного состояния соответствует определенное значение ресурса пластичности и таким образом строится зависимость $L_p = f(\Pi)$. Данная зависимость называется диаграммой пластичности и является характеристикой материала. При этом диаграмма пластичности показывает, насколько металл может деформироваться в локальных областях, например, в устье трещины, в зонах высокой концентрации напряжений и т. д.

Построение диаграмм пластичности является сложной экспериментальной задачей, требующей большого объема испытаний образцов на растяжение, сжатие, кручение, специальных образцов с вырезами, трещинами и т. д. [7]. Однако в работе [8] дана более простая методика построения диаграмм пластичности, позволяющая значительно уменьшить объем экспериментальных испытаний. Полагая постоянными температурно-скоростные условия нагружения, ресурс пластичности от показателя напряженного состояния Π можно найти по следующей формуле:

$$L_p = Ae^{B\Pi}, \quad (6)$$

где A и B – коэффициенты, определяемые из граничных условий для двух известных значений L_p и Π .

Первое значение L_p определяется при разрушении гладкого (без выточек) цилиндрического образца. Согласно [9]

$$\Pi = (1/\sqrt{3})(1 + D_k/R);$$

$$L_p = (2/\sqrt{3}) \ln(D_0/D_k), \quad (7)$$

где D_k – диаметр образца в месте образования шейки; R – радиус шейки; D_0 – начальный диаметр образца.

Второе значение L_p определялось для образцов с кольцевой трещиной. При этом для данного случая показатель напряженного состояния в условиях максимального стеснения был постоянным $\Pi = 4,14$ [10]. Ресурс пластичности в устье трещины при разрушении образца определялся с учетом локальной критической деформации $\epsilon_{кр} = \delta_k/2r_n$,

где δ_k – критическое раскрытие трещины, определяемое по основным соотношениям механики разрушения [10] с учетом критического коэффициента интенсивности напряжений K_{Ic} ($\delta_k = K_{Ic}^2/\sigma_T E$; r_n – радиус пластической зоны в устье трещины, $r_n = (6\pi)^{-1} (K_{Ic}^2/\sigma_T E)$).

Значение L_p с учетом приведенных соотношений находили по формуле

$$L_p = \epsilon_{кр}/\sqrt{3} = \pi\sqrt{3}(\sigma_T/E). \quad (8)$$

Следует также отметить, что концентрация напряжений происходит в зоне перехода от шва к основному металлу и фактическое разрушение сварных соединений при отсутствии дефектов в сварном шве происходит по основному металлу, в расчетные зависимости закладывали характеристики стали 15ХСНД. При этом относительное удлинение цилиндрического гладкого образца из стали 15ХСНД при разрыве составляет 21 %, условный предел текучести $\sigma_T = \sigma_{0,2} = 400$ МПа; $\sigma_B = 475...510$ МПа; $E = 200\,000$ МПа. С учетом найденных экспериментальных значений L_p и Π получили коэффициенты A и B для стали 15ХСНД: $A = 0,27$; $B = -0,7$. Таким образом, диаграмма пластичности для рассматриваемой стали графически представлена на рис. 3 согласно следующей зависимости:

$$L_p = 0,27e^{-0,7\Pi}. \quad (9)$$

Зависимость показателя напряженного состояния Π от коэффициента концентрации напряжений α_σ определяется по данным работы [10]:

$$\Pi = (1/\sqrt{3})\alpha_\sigma^{1,5}. \quad (10)$$

Следуя предложенному деформационному критерию разрушения с учетом того, что максимальная предельная локальная деформация ϵ^{\max} (см. формулу (5)) при разрушении достигает критического значения $\epsilon^{\max} = \epsilon_{кр} = L_p\sqrt{3}$, и определяя значения L_p для стали 15ХСНД по предложенной формуле (9) или по графической зависимости на рис. 3 (с учетом формулы (10)), находим номинальные напряжения при разрушении σ_n . Формально получаемые расчетные значения $\sigma_n > \sigma_B$ следует ограничивать временным сопротивлением материала σ_B ($\sigma_n = \sigma_B$). Это значит, что сварное соединение при разрыве, несмотря на концентрацию напряжений, достигает значений временного сопротивления основного металла, что характерно для сталей с высоким ресурсом пластичности и с коэффициентом концентрации напряжений не выше 3 ($\alpha_\sigma \leq 3$).

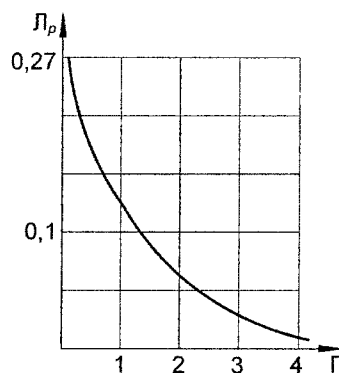


Рис. 3. Диаграмма нахождения предельного значения деформации сдвига L_p стали 15ХСНД

Расчетные и экспериментальные данные, полученные при разрушении образцов из стали 15ХСНД

№	α_σ	П	L_p	$\epsilon_{кр}$	Расчетная нагрузка σ_n , МПа	Экспериментальная нагрузка σ_n , МПа	Погрешность расчета, %
1	3	3	0,03	0,057	$\sigma_n = \sigma_B = 510$	576	11,2
2	3,55	3,86	0,018	0,031	494	507	10,2
3	4	4,61	0,01	0,018	423	418	9,8
4	4,5	5,5	0,005	0,009	200	214	10,7
5	5	6,4	0,003	0,005	155	169	11

На рис. 4 представлены графические зависимости максимальных деформаций угловых сварных соединений от номинальных напряжений σ_n при различных коэффициентах концентрации напряжений α_σ . Прочность сварных соединений (номинальные напряжения при разрушении σ_n) нетрудно определить, используя диаграммы пластичности при условии разрушения: $\epsilon^{\max} = \epsilon_{кр} = L_p \sqrt{3}$.

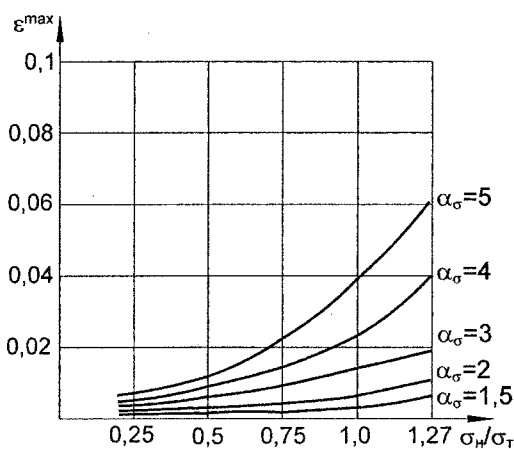


Рис. 4. Зависимость максимальных деформаций сварных соединений от отношения номинального напряжения к пределу текучести при различных коэффициентах концентрации напряжений α_σ

В таблице приведены экспериментальные данные, полученные при разрушении образцов сварных соединений из стали 15ХСНД, выполненных механизированной сваркой в среде углекислого газа проволокой Св-08Г2С. При этом в образцах № 4 и 5 высокие значения α_σ имели место за счет острого подреза глубиной 0,3...0,5 мм и длиной 7...8 мм. Здесь же даны расчетные данные по предлагаемой методике. Видно, что погрешность расчета не превышает 11 %.

Выводы

1. В зависимости от величины коэффициента концентрации напряжений и механических характеристик металла сварных соединений на основе соотношений механики разрушения предложена методика расчета несущей способности угловых сварных соединений закладных изделий арматуры железобетона. При этом в каждом конкретном случае для определенного класса прочности сталей

предоставлена возможность (в процессе визуального и измерительного контроля) анализировать влияние коэффициента концентрации напряжений на прочность сварных соединений.

2. Экспериментальные данные, полученные для сварных соединений из стали 15ХСНД, подтвердили приемлемость полученных расчетных зависимостей для практических инженерных расчетов.

Литература

1. Кархин, В.А. Концентрация напряжений в стыковых сварных соединениях / В.А. Кархин, Л.А. Копельман // Сварочное производство. – 1976. – № 2. – С. 6–7.
2. Макаров, И.И. Методика расчета коэффициента концентрации напряжений сварных стыковых швов / И.И. Макаров // Сварочное производство. – 1977. – № 4. – С. 5–7.
3. Турмов, Г.П. Определение коэффициента концентрации напряжений в сварных соединениях / Г.П. Турмов // Автоматическая сварка. – 1976. – № 10. – С. 14–16.
4. Шрон, Л.Б. Методика расчетной оценки концентрации напряжений в тавровых и нахлесточных сварных соединениях / Л.Б. Шрон // Вопросы сварочного производства: сб. науч. тр. // Челябинск: ЧПИ, 1983. – С. 58–68.
5. Петерсон, Р. Коэффициенты концентрации напряжений / Р. Петерсон. – М.: Мир. – 1977. – 302 с.
6. Нейбер, Г. Концентрация напряжений / Г. Нейбер. – М.: Л: ОГИЗ, 1947. – 240 с.
7. Колмогоров, В.Л. Пластичность и разрушение / В.Л. Колмогоров. – М.: Металлургия, 1977. – 335 с.
8. Шахматов, Д.М. Контактная стыковая сварка чугуна / Д.М. Шахматов, М.В. Шахматов, А.М. Осипов. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2007. – 138 с.
9. Махутов, Н.А. Сопротивление элементов конструкций хрупкому разрушению / Н.А. Махутов. – М.: Машиностроение, 1973. – 200 с.
10. Шахматов, М.В. Прочность механически неоднородных сварных соединений / М.В. Шахматов, Д.М. Шахматов. – Челябинск: «ЦПС Сварка и контроль», 2009. – 223 с.

Поступила в редакцию 24 декабря 2010 г.