

Расчет усиленных стальных конструкций

Расчет усиленных конструкций должен учитывать изменение их статической схемы, напряженного состояния и соответствовать требованиям норм: СП 16.13330.2011 Стальные конструкции (Актуализированная редакция СНиП II-23-81*) и Пособие по проектированию усиления стальных конструкций (к СНиП II-23-81*).

Расчетная схема конструкций должна отражать условия их работы и фактическое состояние, установленные данными обследований. В необходимых случаях следует выполнять расчет с использованием нескольких вариантов расчетных схем и распределения жесткостей, а также *учитывать прогнозируемый износ*.

При расчете конструкций, усиление которых выполняется под нагрузкой, необходимо *учитывать напряжения, существующие в сохраняемых конструкциях в момент усиления*, и последовательность включения в работу дополнительных конструкций, деталей усиления и раскрепления.

При расчете усиливаемых под нагрузкой элементов на устойчивость и деформативность следует *учитывать начальные и дополнительные их деформации*, возникающие на стадии усиления (в частности, дополнительные прогибы, возникающие при усилении с помощью сварки и др.).

Искавления от сварки при проверке устойчивости сжатых и внецентренно сжатых элементов и элементов, работающих на сжатие с изгибом, допускается учитывать введением дополнительного коэффициента условий работы $\gamma_c = 0,8$. В расчетах на общую устойчивость коэффициент условий работы принимается равным $\gamma_c = 0,9$.

В зависимости от условий работы усиливаемые элементы конструкции разделены на **четыре класса**, отличающиеся нормой *допустимых предельных пластических деформаций*:

I. Сварные конструкции, работающие в особо тяжелых условиях эксплуатации (подкрановые балки для кранов режима работы 7К, 8К, элементы конструкций бункерных и разгрузочных эстакад, непосредственно воспринимающие нагрузки от подвижных составов). Расчеты прочности элементов условно выполняются в предположении упругой работы стали;

II. Элементы конструкций, непосредственно воспринимающие подвижные, динамические или вибрационные нагрузки и не входящие в группу I. Норма предельных пластических деформаций $\varepsilon_{p,lim} = 0,001$

III. Элементы конструкций, работающие при статических нагрузках, кроме элементов, относящихся к классу **IV**, $\varepsilon_{p,lim} = 0,002$

IV. Элементы конструкций, работающие при статических нагрузках и удовлетворяющие требованиям СП 16.13330.2011 по обеспечению

При проектировании конструкций *III* класса следует изыскивать возможность отнесения усиливаемых конструкций к *IV* классу, применяя мероприятия, обеспечивающие общую и местную устойчивость (путем введения дополнительных связей, дополнительных ребер жесткости и т. п.).

Статический расчет конструкций, усиливаемых путем увеличения сечений без полной разгрузки, необходимо выполнять на нагрузки, действующие на конструкцию во время усиления (начальное нагружение) и на нагрузки, которые будут действовать на конструкцию после их усиления.

Уровень *начального нагружения* элементов ограничивается с целью обеспечения их несущей способности в процессе усиления в зависимости от предельных пластических деформаций в соответствии с их классом.

Этот уровень начального нагружения характеризуется коэффициентом β_0 , представляющим собой абсолютную величину отношения наибольшего напряжения в усиливаемом элементе в момент усиления к его расчетному сопротивлению:

$$\beta_0 = |\sigma_{0,\max} / R_{y0}|.$$

В общем случае σ_0 (сжатия / растяжения) и изгибом значения σ_0 определяются формулой:

$$\sigma_0 = \frac{N_{0n}}{A_{0n}} \pm \frac{M_{0x}}{I_{x0n}} y + \frac{M_{0y}}{I_{y0n}} x$$

где N_o , M_{ox} , M_{oy} - продольная сила и изгибающие моменты в наиболее нагруженном сечении элемента.

При расчете усиления гибких сжато-изогнутых или внецентренно сжатых стержней моменты M_o вычисляются по деформированной схеме с учетом прогибов стержня:

$$M_o = N_o (e + f_o),$$

где $e = M_o / N_o$ - начальный эксцентриситет продольной силы; M_o - расчетное значение момента, вычисляемое по недеформированной схеме.

$$f_o = \frac{N_o e}{N_{oэ} - N_o}$$

здесь f_o - начальный прогиб элемента.

В случае когда $M'_o = 0$ необходимо учитывать малые случайные эксцентриситеты произвольного направления, определяемые формулой

$$e = \frac{m_o W_o}{\lambda_o}$$

где m_o - случайное значение начального относительного эксцентриситета, принимаемое в функции гибкости λ_o ; W_o - момент сопротивления неусиленного сечения.

Расчетное значение f_0 принимается не менее замеренного при натурном обследовании конструкций. При усилении искривленных центрально-сжатых стержней направление e определяется направлением их начального прогиба.

Предельный уровень начального нагружения элементов для конструкций, усиливаемых с помощью сварки, в зависимости от класса конструкций ограничивается условиями:

$\beta_0 \leq 0,2$ - для *I* класса;

$\beta_0 \leq 0,4$ - для *II* класса;

$\beta_0 \leq 0,8$ - для *III* и *IV* классов.

Если указанные условия не выполняются, то необходима либо предварительная разгрузка конструкций, либо использование специальных технологических мероприятий при усилении, обеспечивающих ограничение деформаций конструкций (в частности, сварочных).

Расчет усиленных элементов на прочность

Проверку прочности элементов в зависимости от их класса осуществляют:

- для элементов *I*, *II* и *III* классов - по критерию *краевой текучести*.

В случае усиления под нагрузкой указанный критерий является чисто

Фактически рассматриваемый критерий обеспечивает ограничение уровня пластических деформаций нормой согласно классу элемента.

- для элементов **IV** класса - по критерию развитых пластических деформаций. Оценка прочности осуществляется исходя из оценки несущей способности усиленных сечений по критерию пластического шарнира, но с введением специальных понижающих коэффициентов γ_N и γ_M , гарантирующих ограничение уровня пластических деформаций нормой $\varepsilon_{p,lim} = 0,004$.

Коэффициенты γ_N и γ_M принимаются в зависимости от схемы усиления, соотношения прочностных характеристик материалов, уровня и условий нагружения усиливаемого элемента.

Проверка прочности элементов по критерию краевой текучести выполняется по формулам:

центрально-растянутые или сжатые симметрично усиленные
$$N / A_n \leq R_{yo} \gamma_c \gamma_N$$

элементы

где γ_N - коэффициент, учитывающий уровень и знак начальной осевой силы; для растянутых и сжатых элементов, усиленных без использования сварки, - $\gamma_M = 0,95$; для сжатых элементов, усиленных с помощью сварки,

изгибаемые элементы

$$M / W_n \leq R_{yo} \gamma_c \gamma_M$$

сжато- и растянуто-изогнутые элементы

$$\frac{N}{A_n} \pm \frac{M_x}{I_{xn}} y \pm \frac{M_y}{I_{yn}} x \leq R_{yo} \gamma_c \gamma_M$$

В формулах для элементов *I* класса принимается $\gamma_M = 0,95$; для элементов *II* и *III* классов – $\gamma_M = 1,0$.

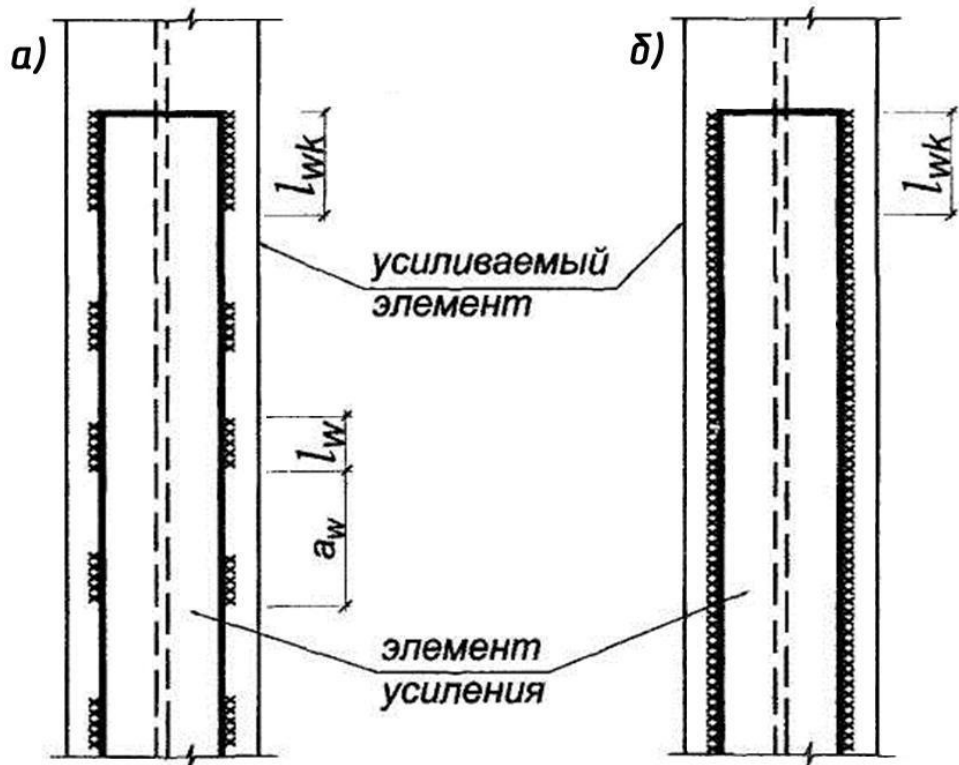
При $N/(A_n \cdot R_{yo}) > 0,6$ значения $\gamma_M - \gamma_N$

Проверка прочности центрально-растянутых или сжатых несимметрично усиленных элементов осуществляется по той же формуле, при этом изгибающие моменты подсчитываются относительно осей *X* и *Y* усиленного сечения.

Присоединение элементов усиления

Соединения при помощи сварки

При усилении статически нагруженных конструкций **III** и **IV** классов, эксплуатируемых при температуре выше минус 30 °С в неагрессивной среде, рекомендуется использовать прерывистые (шпоночные) швы (**а**). Шаг шпонок следует принимать максимально допустимым по расчету, но не свыше $80i_{min}$ в растянутых и $40i_{min}$ в сжатых элементах усиления. Здесь i_{min} - минимальный радиус инерции элемента усиления относительно его собственной центральной оси.



Присоединение
элементов усиления:

а - прерывистыми
швами;

б - сплошными швами

Для конструкций I и II классов использование прерывистых швов не допускается. Расчет непрерывных участков шпоночных швов осуществляется на сдвигающее усилие:

$$T_r = \frac{Q_{\max} S_r}{I} a_w$$

где Q_{\max} - наибольшая поперечная сила в пределах длины элементов усиления,

S_r - статический момент элемента усиления относительно центральной оси усиленного сечения; a_w - шаг шпонок шва.

Для сжатых стержней $Q_{\max} > Q_{fic}$,

где Q_{fic} - условная поперечная сила для усиленного изгибаемого стержня, определяемая по формуле:

$$Q_{fic} = 7,15 \cdot 10^{-6} \left(2330 - \frac{E}{R_y} \right) \frac{N}{\phi}$$

Минимальные длины участков шпоночных швов в см, определяются по формуле:

$$l_w = \frac{\alpha_w T}{\beta_w k_f R_w \gamma_w \gamma_c} + 1$$

где α_w - коэффициент, характеризующий распределение усилий между швами, прикрепляющими элемент усиления к основному стержню и равный доле общего усилия T , относящийся к рассматриваемому шву.

Длину участка шпоночного шва следует принимать *не менее 50 мм*.

Концевые участки шпоночных швов присоединения элементов к основному стержню или узловым фасонкам должны обеспечивать передачу продольных усилий на элементы усиления и вовлечение их в совместную с основным стержнем работу. Их толщина может назначаться *большой*, чем толщина связующих швов. Минимальные длины концевых участков подсчитываются по формуле:

$$l_{wk} = \frac{\alpha_w (T + N_r)}{\beta_w k_f R_w \gamma_w \gamma_c} + 1$$

где
$$N_r = (N - N_0) A_r / A$$

A_r - площадь поперечного сечения элемента усиления.

При усилении изгибаемых элементов ($N=0$) следует принимать:

$$N_r = 0,5 A_r R_{yr}.$$

Минимальный катет сплошных швов, крепящих элементы усиления, определяется выражением:

$$k_f = \frac{\alpha_w Q_{max} S_r}{\beta_w I R_w \gamma_w \gamma_c}.$$

Концевые участки швов могут назначаться с увеличенным катетом, а их прочность (при расчетной длине $85\beta_w k_f$) проверяется по формуле:

$$\frac{\alpha_w Q_{max} S_r}{\beta_w k_f I} + \frac{\alpha N_r}{85\beta_w^2 k_w^2} \leq R_w \gamma_w \gamma_c.$$

Болтовые соединения

Применение болтов для присоединения элементов усиления рекомендуется в случаях, когда:

- *болтовые соединения технологически более удобны;*
- *материал усиливаемого элемента не допускает применения сварки;*
- *желательно избежать возникновения дополнительных сварочных напряжений и деформаций.*

Проектировать соединения следует с учетом минимального ослабления сечений. С этой целью диаметр болтов следует принимать минимальным, а их размещение задавать со сбитым шагом по отношению к существующим болтам или заклепкам.

Шаг промежуточных соединений принимается не более $40i$ в сжатых и $80i$ в растянутых элементах усиления и определяется по формуле:

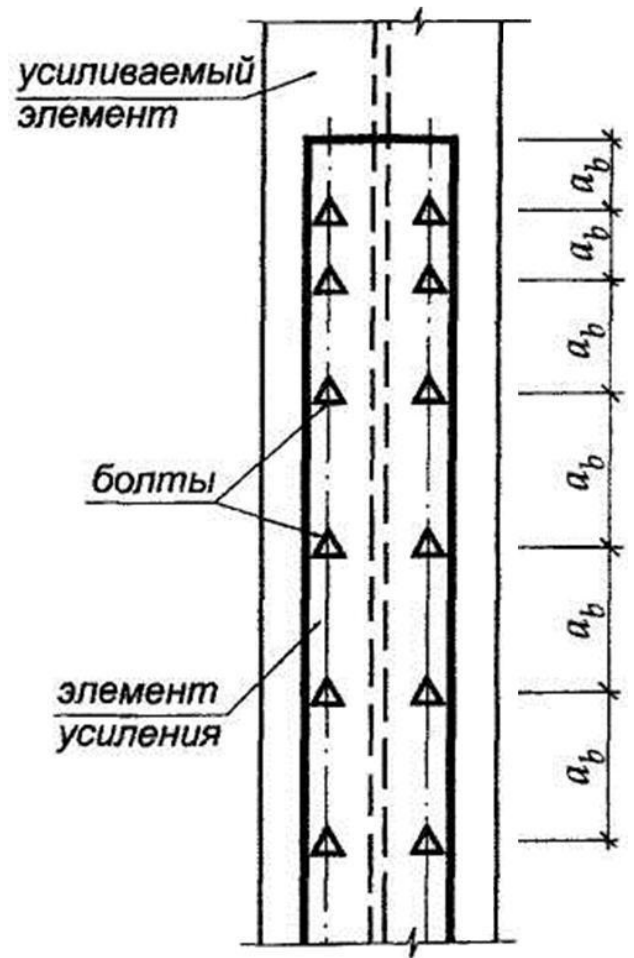
$$a_B = \frac{[N_B]_{\min} I \gamma_c}{Q_{\max} S_r}$$

где $[N_B]_{\min}$ - минимальная несущая способность болта (по сдвигу, срезу или смятию), определяется по СП 16.13330.2011.

Прочность концевых участков соединений элемента усиления проверяется по формуле:

$$\frac{N_r}{n} + \frac{Q_{\max} S_r}{I} a_b \leq [N_B]_{\min}$$

где n - количество болтов на концевом участке соединения; a_b - расчетный шаг болтов.



Присоединение элементов усиления болтами

Требования, предъявляемые к технологии выполнения работ по усилению

При разработке проекта усиления необходимо выбрать и отразить в рабочих чертежах принципиальные положения производства работ:

- последовательность выполнения работ по усилению конструкции в целом и ее отдельных элементов;
- увязку работ по усилению с технологическим процессом (ограничения по нагрузкам и воздействиям) и условиями их проведения (например, температурный режим);
- меры по обеспечению прочности и устойчивости конструкций на всех этапах производства работ, включая указания об устройстве временных опор и раскреплений и требования к значениям монтажных нагрузок и воздействий;
- перечень конкретных зон, узлов, конструктивных элементов и технологических операций, для которых требуется соблюдение определенной последовательности и параметров технологических процессов (режим сварки, регламент предварительного напряжения и т.п.);
- перечень работ и операций, которые следует принимать по актам на скрытые работы или которые требуют промежуточного контроля.

Усиление конструкций с использованием способов, впервые внедряемых в производство или впервые осваиваемых монтажной организацией, должно производиться при авторском надзоре. Необходимость авторского надзора должна быть указана в проектной документации.

При разработке проекта усиления конструкций, эксплуатирующийся в сложных условиях, способствующих накоплению повреждений (интенсивные динамические или термоциклические воздействия, развивающаяся коррозия и т.п.), обязательно требуется указать предельный срок реализации проекта, после которого проектные решения должны быть уточнены или пересмотрены.

При усилении конструкций путем регулирования усилий (напряжений) в проектной документации должны быть указаны допустимые отклонения усилий регулирования или задаваемых перемещений, а также места и способы контроля параметров регулирования и напряженно-деформированного состояния конструкций.

Технология работ при усилении конструкций под нагрузкой должна обеспечивать минимально возможное ослабление сечений усиливаемых элементов, которое может быть вызвано нагревом при сварке или рассверловкой дополнительных отверстий.

При усилении элементов конструкций путем увеличения сечений с помощью сварки рекомендуется соблюдать следующий порядок работы:

- присоединение (прижатие) элементов усиления по всей их длине к усиливаемой конструкции с помощью струбцин, оттяжек и т.п.;
- приварка элементов усиления на сварочных прихватах длиной 20-30 мм и шагом 300-500 мм;
- сварка концевых участков, включающих в работу элементы усиления;
- наложение связывающих швов, обеспечивающих совместную работу усиливаемого стержня и элементов усиления.

При усилении путем увеличения сечений двух или более элементов (пролетов) статически неопределимых конструкций (рам, неразрезных балок и т.п.) вначале следует присоединить элементы усиления ко всем усиливаемым стержням системы на сварочных прихватках и лишь затем приступать к сварке концевых участков и связующих швов. Сварку швов усиливаемых стержней следует выполнять последовательно, начиная с наименее нагруженного стержня (пролета) конструкции.

При двусторонних схемах увеличения сечений вначале следует приварить элементы усиления, расположенные со стороны растянутых волокон, затем - со стороны сжатых. Знак напряжений (растяжение, сжатие) при переменном на участке усиления эпюре моментов

При наличии заделки на одном из концов стержня приварку растянутых элементов усиления следует начинать от противоположного конца элемента к заделке, для сжатых элементов - обратное направление.

С целью уменьшения прогибов гибких сжатых стержней в процессе сварки связывающие швы каждого из элементов усиления следует накладывать участками небольшой протяженности (до 7,0 см), выдерживая перерывы между сваркой участков 2-5 мин. Парные симметричные (относительно плоскости действия сил) швы следует накладывать параллельно. При наличии более двух швов в одном сечении с целью уменьшения ослаблений сечений следует использовать перекрестное наложение швов.

В момент усиления должны быть исключены все подвижные на грузки, передающие на усиливаемые конструкции удары и вибрации.

При невысоком уровне начального нагружения ($\beta_0 \leq 0,3$) усиливаемых конструкций порядок выполнения усиления и последовательность сварки незначительно влияют на напряженное состояние конструкций и возможны отступления от указаний.

При присоединении элементов усиления на *болтах* необходимо вести работы с минимально возможным ослаблением усиливаемого элемента.

С этой целью после завершения сборки на струбцинах следует вначале одним или двумя болтами прикрепить концы элементов усиления, затем, направляясь к середине, установить остальные. Каждое последующее отверстие начинают сверлить только после установки болта в предыдущее. После установки всех промежуточных болтов заканчивают прикрепление концов элемента.

Исправление дефектов

Дефекты и повреждения в виде трещин в основном металле или сварных швах могут быть устранены:

- заваркой трещин (при соответствующем обосновании трещина может быть остановлена при условии деконцентрации напряжений в ее устье);

- заменой дефектных мест;

- усилением конструктивного элемента;

- заменой конструктивного элемента.

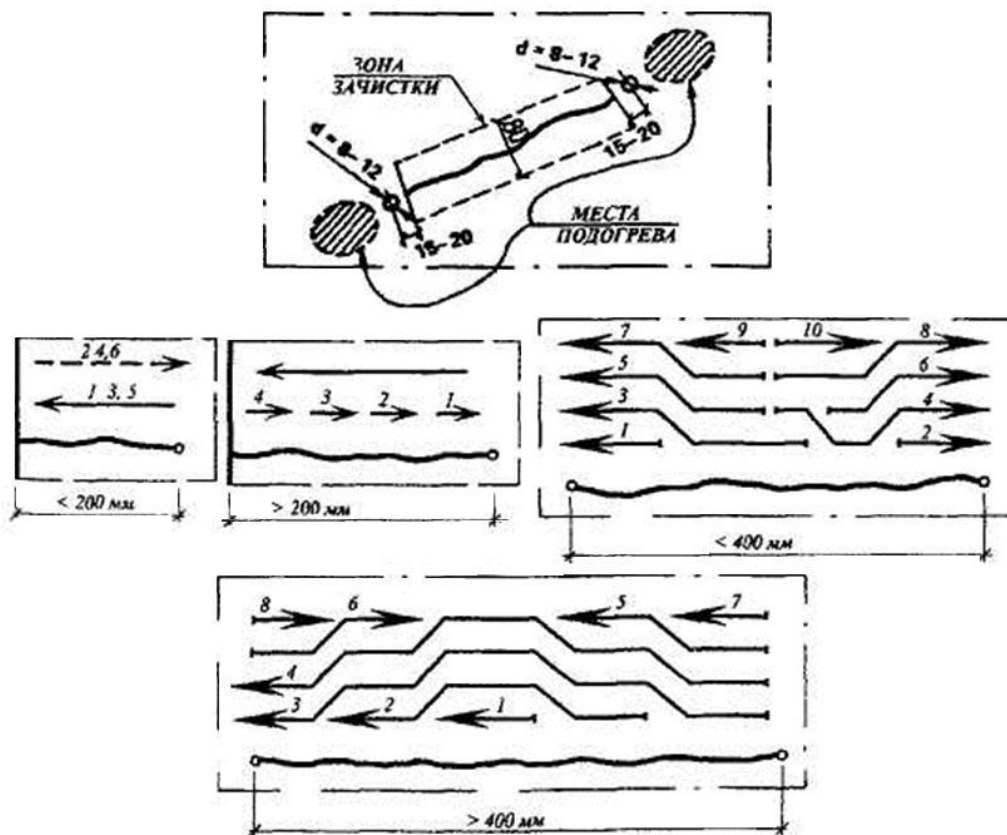
Заварка трещин производится в следующей последовательности:

- зачистка зоны до чистого металла по ширине не менее 80 мм и выявление концов трещины;

- сверловка в концах трещины на расстоянии 15...20 мм по ходу ее распространения отверстий-ловителей \varnothing 8-12 мм;

- разделка кромок трещин под сварку;

- подогрев концевых участков трещины до температуры 100...150 °С и поддержание ее в течение всего времени заварки трещины;
- заварка шва обратноступенчатым методом на проход с проковкой каждого прохода, кроме первого и последнего;
- обработка заваренной поверхности шлифовальной машинкой и снятие шва до высоты 2 мм над поверхностью основного металла и рассверловкой отверстий-ловителей до 20...25 мм;
- сплошной контроль швов физическими методами.



Подготовка и заварка трещин