

Соединения ЭЛЕМЕНТОВ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ


Сварные соединения

Начать работу



К содержанию





Сварное соединение – это неразъёмное соединение, полученное посредством установления межатомных связей между соединяемыми частями при их нагревании

Сварное соединение неоднородно – оно имеет [сложную структуру](#), которая возникает вследствие неравномерного нагрева металла в окрестности точки сварки до высоких температур.

Для учёта особенностей работы и расчёта сварные соединения принято разбивать на четыре типа: [стыковые](#), [тавровые](#), [угловые](#) и [нахлесточные](#).

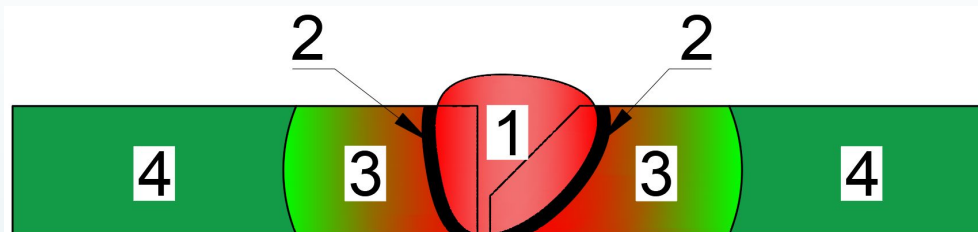
Для оценки прочности сварное соединение разбивают на несколько [основных зон](#), каждая из которых имеет свои прочностные свойства. При оценке прочности соединения, как правило, рассчитывают две основные зоны: сварной шов и границу сплавления. Сварные швы, в свою очередь тоже разбивают на типы, которых всего два: [стыковые и угловые](#).

N. B.

Неоднородность сварного соединения приводит к появлению значительных остаточных напряжений, что создаёт опасность разрушения как при статическом, так и при циклическом нагружении (усталость). Поэтому к [выбору сварного шва](#) следует подходить очень ответственно.



Структура сварного соединения



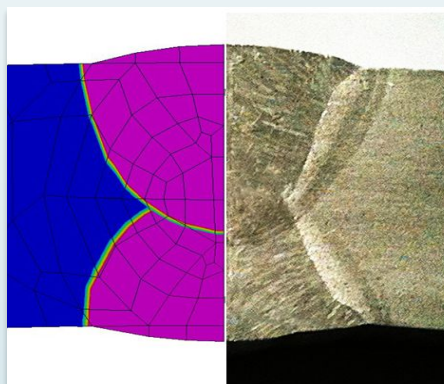
1 Сварной шов



участок сварного соединения, образовавшийся в результате кристаллизации расплавленного металла.

Он же:
металл шва или просто МШ

2 Граница сплавления



зона частично сплавившихся зёрен на границе основного металла и металла шва

Она же:
ГС, околошовная зона или просто ОШ

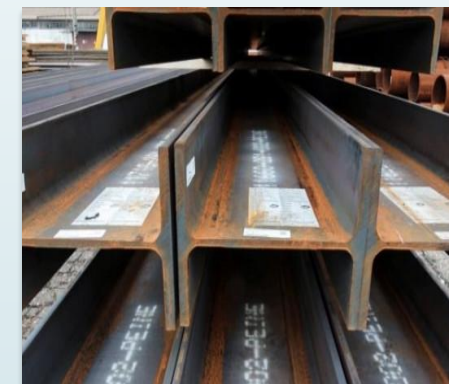
3 Зона термического влияния



участок основного металла, не подвергшийся расплавлению, структура и свойства которого изменились в результате нагрева

Она же:
ЗТВ

4 Основной металл



металл соединяемых элементов, не изменившийся в процессе сварки.

Он же:
ОМ



Типы сварных швов

- Стыковой шов
 - Шов с полным проплавлением хотя бы одной из соединяемых деталей
 - Нагрузка в таком шве передаётся без смещения из плоскости листа
 - Расчёт таких швов ведётся по эквивалентным напряжениям

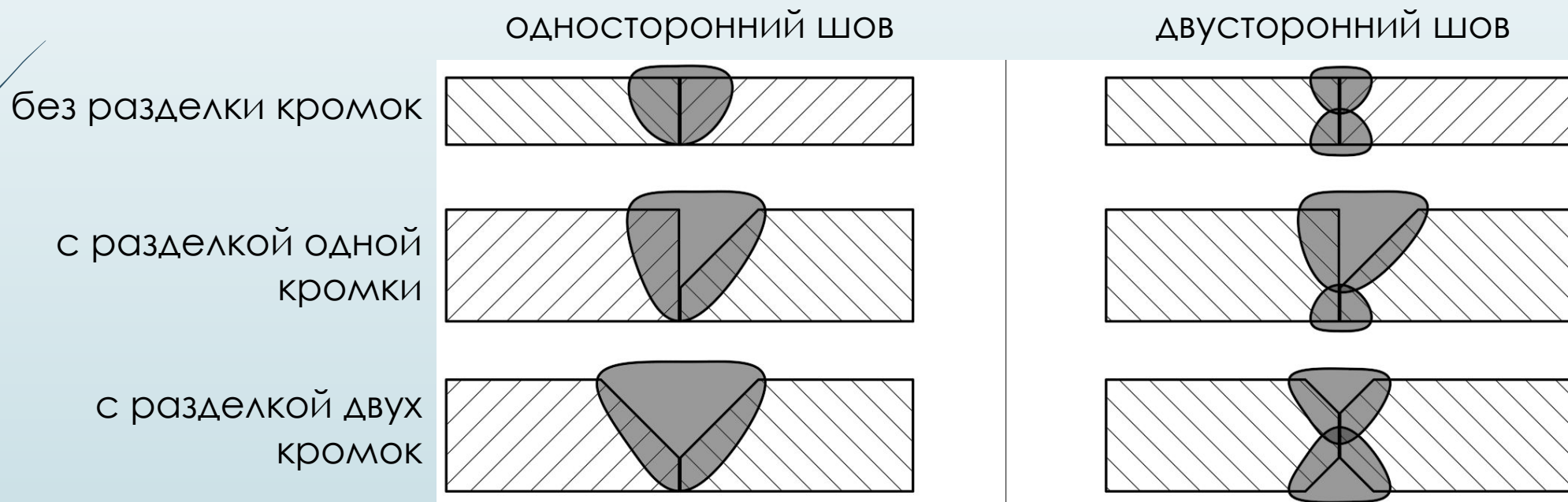
- Угловой шов
 - Шов с неполным проплавлением соединяемых деталей
 - Нагрузка в таком шве передаётся со смещением из плоскости листа
 - Расчёт таких швов ведётся по касательным напряжениям

Формы и размеры сварных швов стандартизированы, однако, при необходимости, конструктор может разрабатывать сварные швы со своими формой и размерами.



Стыковые сварные соединения

Стыковое соединение соединяет кромки листов лежащих в одной плоскости и выполняется [СТЫКОВЫМ ШВом](#). Шов может быть наложен с одной стороны соединения (односторонний шов) и с двух сторон (двусторонний шов). Кроме того швы различают по подготовке кромок соединяемых деталей – с разделкой и без разделки кромок. Форма и размеры сварных швов и обработки кромок определяются соответствующим [СТАНДАРТОМ](#).



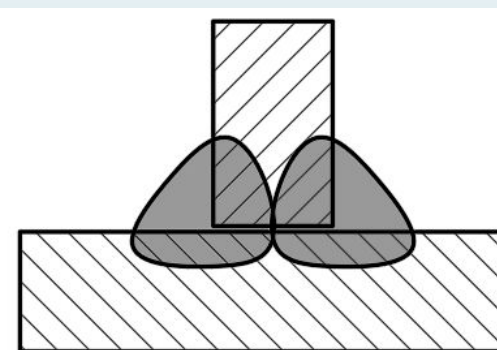
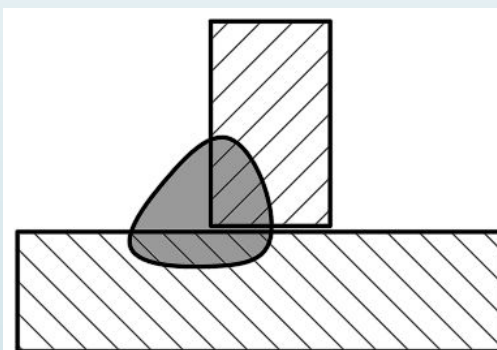
Тавровые сварные соединения

Тавровое соединение соединяет кромку одного листа с поверхностью другого и выполняется стыковыми и угловыми швами. Шов может быть наложен с одной стороны соединения (односторонний шов) и с двух сторон (двусторонний шов). Кроме того швы различают по подготовке кромки одной из соединяемых деталей – с разделкой и без разделки. Форма и размеры сварных швов и обработки кромок определяются соответствующим [СТАНДАРТОМ](#).

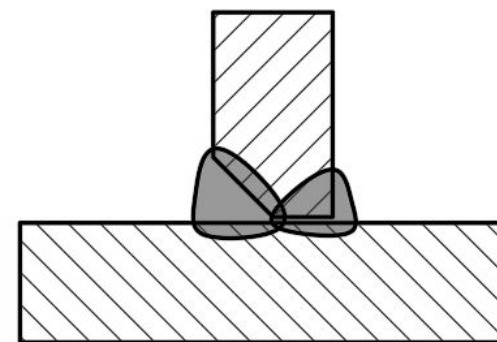
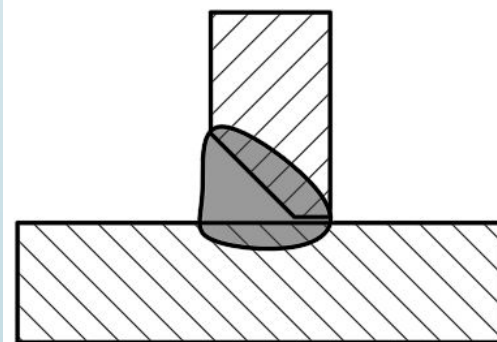
односторонний шов

двусторонний шов

без разделки кромок



с разделкой кромки



Угловые сварные соединения

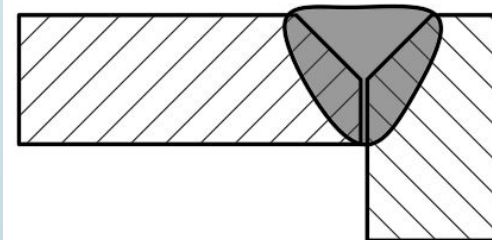
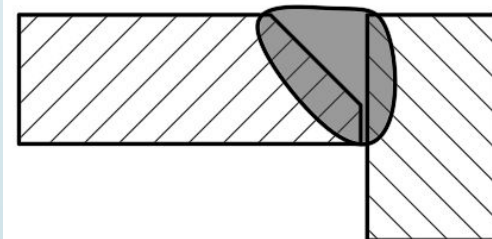
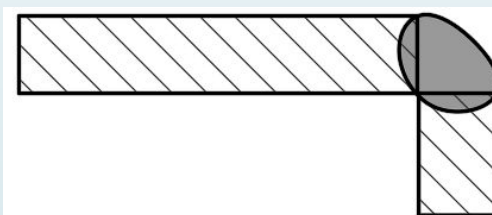
Угловое соединение соединяет кромки листов лежащих в пересекающихся плоскостях и выполняется стыковыми и угловыми швами. Шов может быть наложен с одной стороны соединения (односторонний шов) и с двух сторон (двусторонний шов). Кроме того швы различают по подготовке кромок соединяемых деталей – с разделкой и без разделки кромок. Форма и размеры сварных швов и обработки кромок определяются соответствующим [СТАНДАРТОМ](#).

без разделки кромок

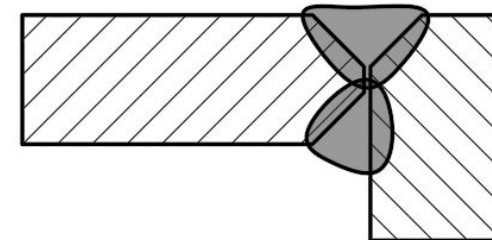
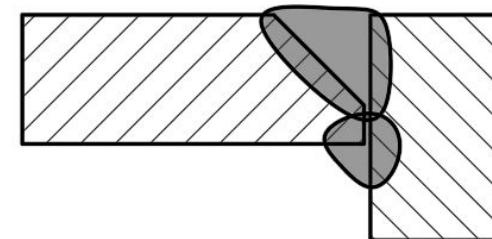
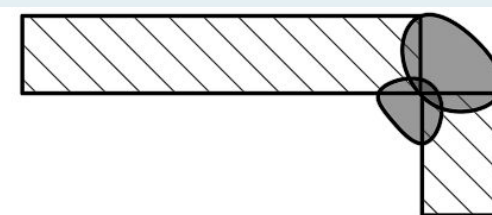
с разделкой одной
кромки

с разделкой двух
кромки

односторонний шов



двусторонний шов

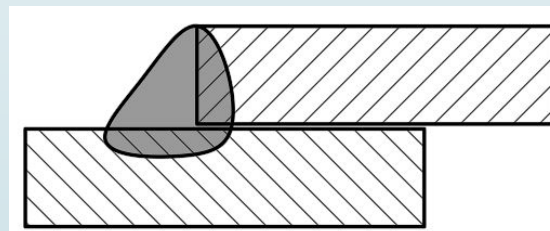


Нахлесточные сварные соединения

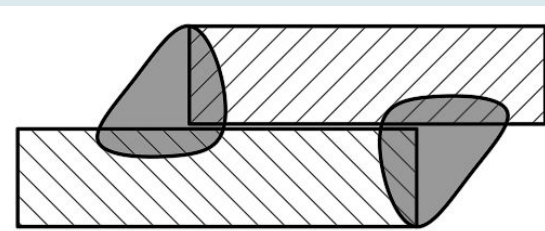
Нахлесточное соединение соединяет листы, лежащие в параллельных плоскостях, при этом кромки обоих листов свариваются с поверхностью смежного листа. Такое соединение выполняется только угловыми швами. Шов может быть наложен с одной стороны соединения (односторонний шов) и с двух сторон (двусторонний шов). Швы нахлесточных соединений выполняются без разделки кромок.

Форма и размеры сварных швов определяются соответствующим [СТАНДАРТОМ](#).

односторонний шов



двусторонний шов



Указания по проектированию сварных соединений для металлоконструкций кранов

□ Выбор вида сварки

1. Для длинных ответственных сварных соединений (е. г. для соединения поясов балок со стенками) следует применять автоматическую сварку.
2. Для коротких сварных швов, там где применение сварочного автомата невозможно или нецелесообразно (е. г. для соединения диафрагм со стенками и поясами), следует применять полуавтоматическую сварку.
3. Ручную сварку применяют, как правило, при отсутствии оборудования или невозможности его доставки к месту сварки – в основном при проведении ремонтных работ или монтажных работ на высоте).
4. Наиболее универсальным способом сварки является сварка в среде защитных газов, сварку под флюсом есть смысл применять при соединении материалов с плохой свариваемостью.

□ Выбор формы шва и соединяемых кромок

1. Выбор формы шва и разделки кромок зависит от толщины свариваемых деталей (соответствующие ограничения приведены в стандартах).
2. При выборе сварного шва следует отдавать предпочтение двусторонним швам.
3. В случае невозможности применения двустороннего шва (е. г.), применяют односторонний шов на остающейся подкладке.
4. При прочих равных условиях меньшую концентрацию напряжений даёт шов с разделкой кромок, поэтому при возможности следует выбирать его.
5. При проектировании соединений листов под прямым углом тавровые швы следует предпочитать угловым – они позволяют добиться лучшей проварки и, следовательно, лучшего качества соединения.



Пример – сборка коробчатого элемента

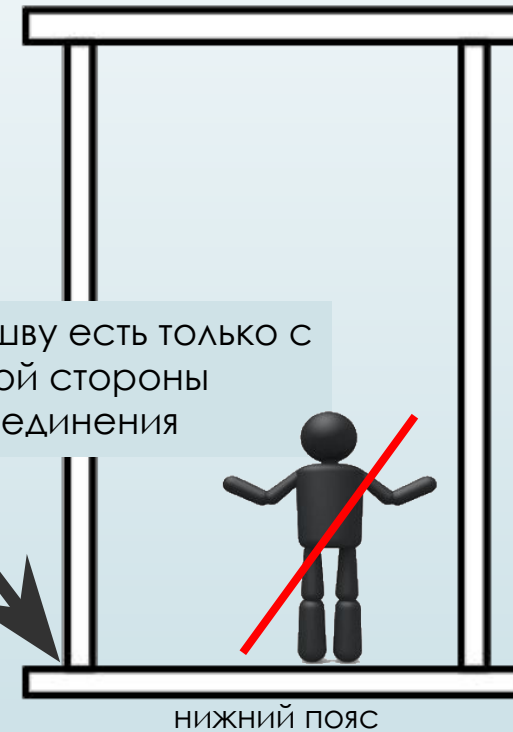
Операция 1
привариваем верхний пояс



Операция 2
привариваем нижний пояс

верхний пояс уже приварен

доступ к шву есть только с одной стороны соединения



Расчёт соединений со стыковыми швами

Сварные соединения, выполненные с применением стыковых сварных швов, при перегрузке разрушаются по основному металлу на некотором удалении от шва.

Проверку прочности выполняют по условию:

$$\sigma_e \leq \gamma_n \cdot \gamma_d \cdot \gamma_c \cdot R_y$$

где

σ_e – эквивалентные напряжения по теории Мизеса, которые могут быть определены МКЭ или аналитически;

γ_n – [коэффициент надёжности по назначению конструкции](#), определяемый в зависимости от вида и последствий повреждения;

γ_d – [коэффициент надёжности математической модели](#) сварного соединения, принимаемый в зависимости от типа и метода расчёта, типа сварного соединения и напряжённого состояния шва;

γ_c – коэффициент условий работы металла шва и околошовной зоны, принимаемый равным 1,00 при физическом контроле качества швов, и 0,85 при визуально-измерительном контроле;

R_y – [расчётное сопротивление](#) материала по пределу текучести, принимаемое по стандарту, техническим условиям либо по результатам сертификационных испытаний.



Расчёт соединений со стыковыми швами

Для тонкостенных конструкций, как правило, характерно двухосное напряжённое состояние, поскольку на свободной поверхности листа напряжения не возникают. В этом случае при определении эквивалентных напряжений учитываются только три компонента тензора: σ_x , σ_y , τ_{xy} . Формула эквивалентных напряжений по теории Мизеса будет иметь вид:

$$\sigma_e = \sqrt{\sigma_x^2 - \sigma_x \cdot \sigma_y + \sigma_y^2 + 3 \cdot \tau_{xy}^2}$$

где

σ_x – нормальные напряжения, действующие поперёк сварного шва;

σ_y – нормальные напряжения, действующие вдоль сварного шва;

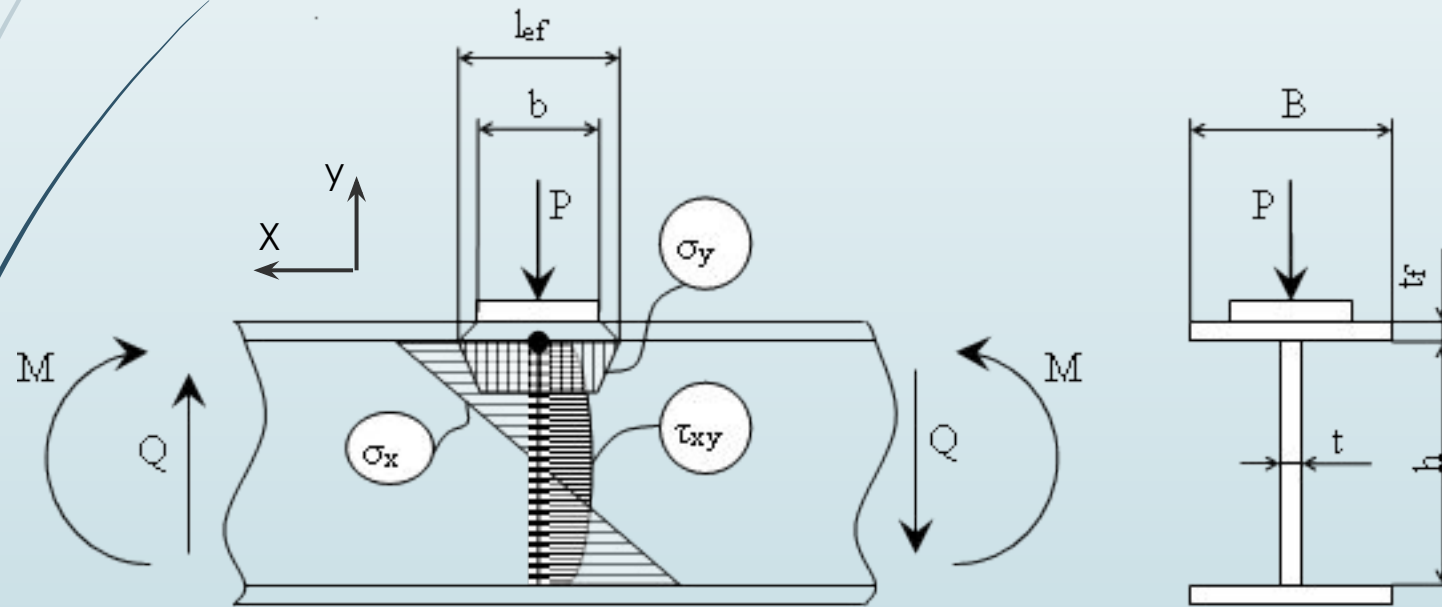
τ_{xy} – касательные напряжения в сварном шве.



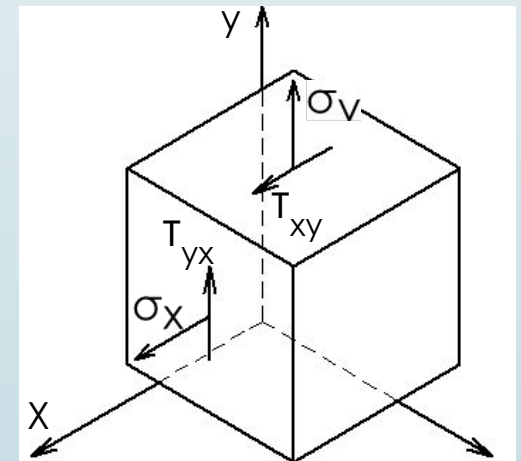
Расчёт соединений со стыковыми швами (пример 1)

В качестве примера рассмотрим расчёт сварного шва ездовой балки крана в месте установки опорной подкладки рельса (см. рисунок). В этом случае в шве возникают нормальные напряжения от изгибающего момента M , местные нормальные напряжения от силы P и касательные напряжения, вызванные перерезывающей силой Q . Эпюры этих напряжений показаны на рисунке.

Видно, что наихудшая комбинация компонент тензора напряжений возникает в [верхней точке](#) сварного шва в месте соединения стенки с поясом. Для этой точки мы и будем определять величину эквивалентных напряжений.



На рисунке ниже показано взаимное расположение компонент тензора напряжений в расчётной точке



Расчёт соединений со стыковыми швами (пример 1)

Нормальные напряжения в указанной точке, возникающие в результате действия изгибающего момента, и направленные параллельно оси балки определяются по формуле:

$$\sigma_x = \frac{h \cdot M}{J_z \cdot 2}, \text{ где}$$

J_z – момент инерции расчётного сечения балки относительно горизонтальной оси;
 h – высота стенки балки.

Местные напряжения в указанной точке, возникающие в результате действия силы P , и направленные поперёк сварного шва определяются по формуле:

$$\sigma_y = \frac{P}{l_{ef} \cdot t}, \text{ где}$$

t – толщина стенки балки;

l_{ef} – условная длина распределения нагрузки, определяемая по формуле:

$$l_{ef} = b + 2 \cdot t_f, \text{ где}$$

b – размер опорного элемента в направлении вдоль стенки балки;

t_f – толщина верхнего пояса балки.

Касательные напряжения в указанной точке определяются по формуле Журавского:

$$\tau_{xy} = \frac{Q \cdot S_z^{oc}}{J_z \cdot t}, \text{ где}$$

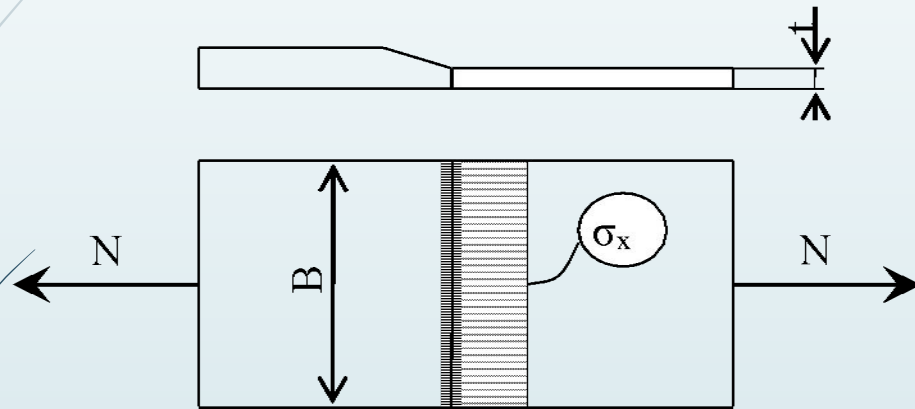
S_z^{oc} – статический момент отсечённой части сечения для расчётной точки, который определяется по формуле:

$$S_z^{oc} = B \cdot t_f \cdot \left(\frac{h}{2} + \frac{t_f}{2} \right)$$



Расчёт соединений со стыковыми швами (пример 2)

В случае работы сварного шва только на центральное растяжение или сжатие (см. рисунок) напряжённно-деформированное состояние является одноосным.



В этом случае компоненты σ_y и τ_{xy} равны нулю, а эквивалентное напряжение равно σ_x , которое можно определить по формуле:

$$\sigma_e = \sigma_x = \frac{N}{t \cdot l_w}, \text{ где}$$

N – растягивающее или сжимающее усилие;
 t – наименьшая толщина соединяемых элементов;

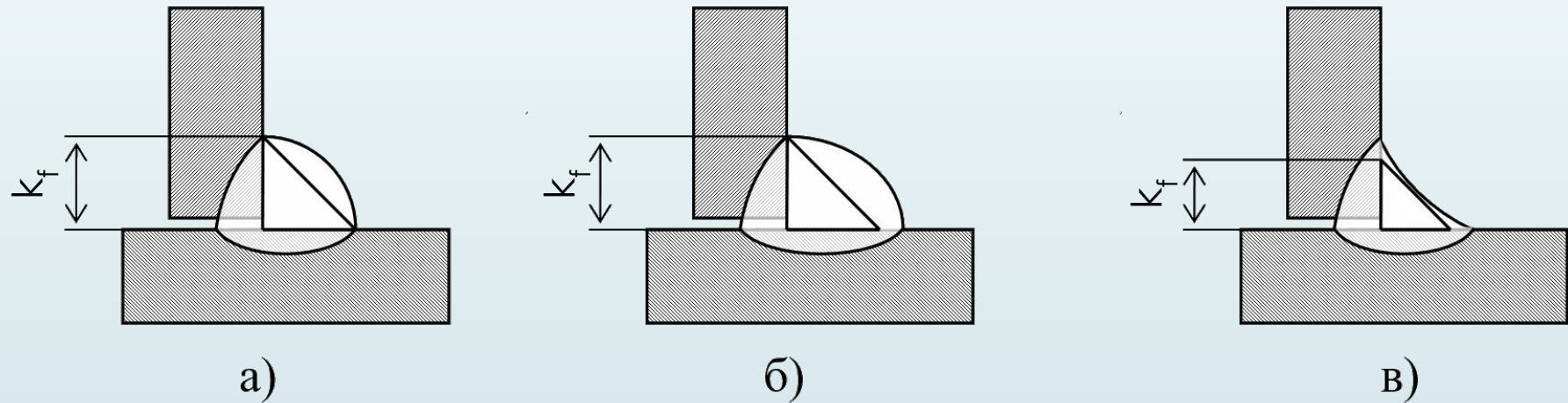
l_w – расчётная длина сварного шва, которая равна ширине сварного листа B в случае начала и окончания шва на выводных планках. При сварке без выводных планок расчётная длина шва определяется по формуле:

$$l_w = B - 2 \cdot t$$



Расчёт соединений с угловыми швами

Основным геометрическим параметром, характеризующим угловой шов является его катет k_f , который определяется как катет прямоугольного треугольника с углом при гипотенузе в 45° вписанного в сечение шва. Схемы определения катета для различных форм шва приведены на рисунке ниже.

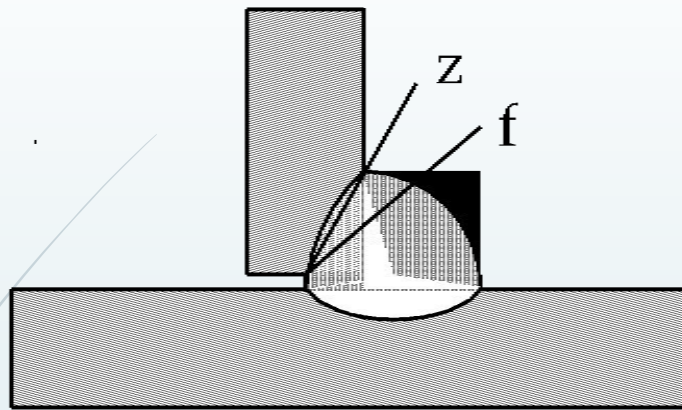


На рисунке обозначено:

- а) симметричный выпуклый шов;
- б) несимметричный выпуклый шов;
- в) вогнутый шов.



Расчёт соединений с угловыми швами



Проверку прочности соединений с угловыми швами выполняют на условный срез по двум сечениям: по металлу шва и металлу границы сплавления (см. рисунок слева).

На рисунке буквой f обозначено сечение по металлу шва, буквой z – сечение по границе сплавления.

Проверку прочности угловых швов следует выполнять для обоих сечений по касательным напряжениям.

Условия прочности запишем в виде:

для металла шва $\tau_f \leq \gamma_n \cdot \gamma_d \cdot \gamma_{wf} \cdot R_{wf}$

для границы сплавления $\tau_z \leq \gamma_n \cdot \gamma_d \cdot \gamma_{wz} \cdot R_{wz}$, где

τ_f, τ_z – напряжения в расчётных сечениях по металлу шва и границы сплавления соответственно

γ_{wf}, γ_{wz} – коэффициенты условий работы шва, равные 1 во всех случаях, кроме перегрузочных машин климатических исполнений ХЛ, для которых эти коэффициенты равны 0,85

R_{wf} – [расчётное сопротивление металла шва](#), определяемое в зависимости от применяемого сварочного материала

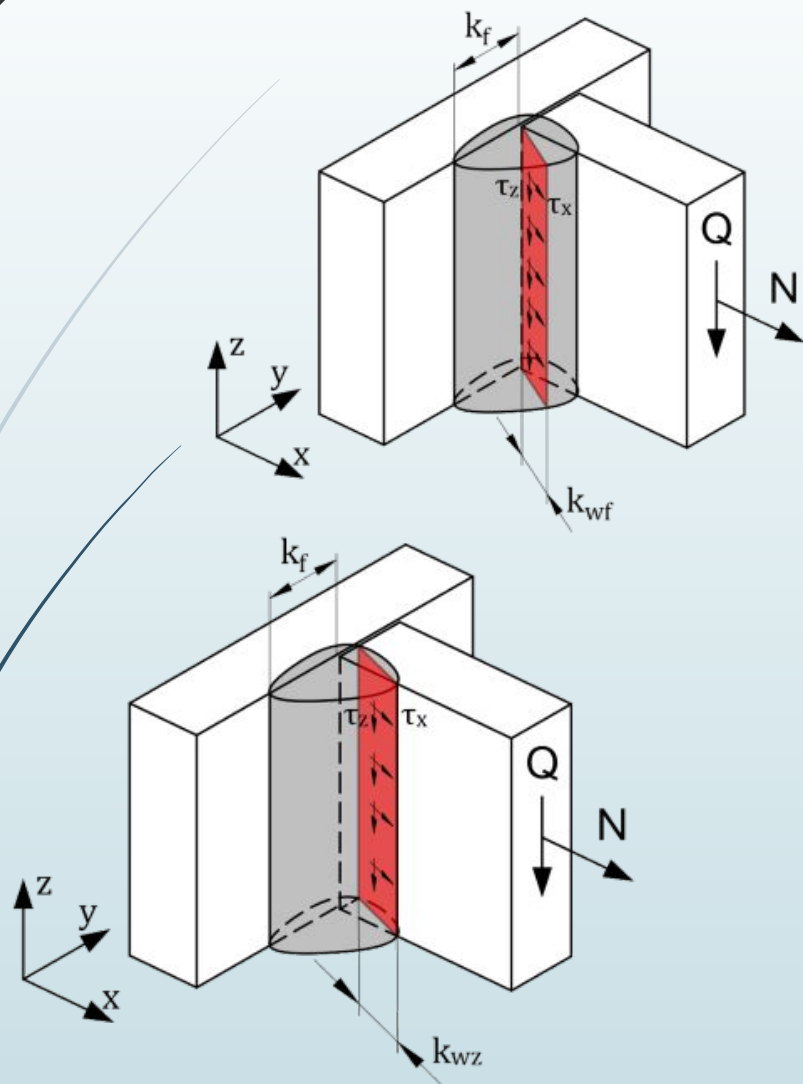
R_{wz} – расчётное сопротивление металла границы сплавления, определяемое по формуле

$$R_{wz} = 0,45 \cdot R_{un}, \text{ где}$$

R_{un} – [нормативное сопротивление материала](#) по пределу прочности, определяемое в зависимости от свариваемых сталей



Расчёт соединений с угловыми швами



При действии нескольких силовых факторов напряжения в расчётных сечениях определяются геометрическими суммами напряжений, вызываемых продольными и поперечными силами и моментом.

Так на рисунках слева в расчётных сечениях шва (на верхнем рисунке расчётное сечение проходит по металлу шва, на нижнем – по границе сплавления) действуют касательные напряжения по двум направлениям x и y . В этом случае суммарные напряжения среза по МШ и ГС вычисляются по формулам:

$$\tau_{fxy} = \sqrt{\tau_{fx}^2 + \tau_{fy}^2} \text{ и } \tau_{wxy} = \sqrt{\tau_{wx}^2 + \tau_{wy}^2}$$

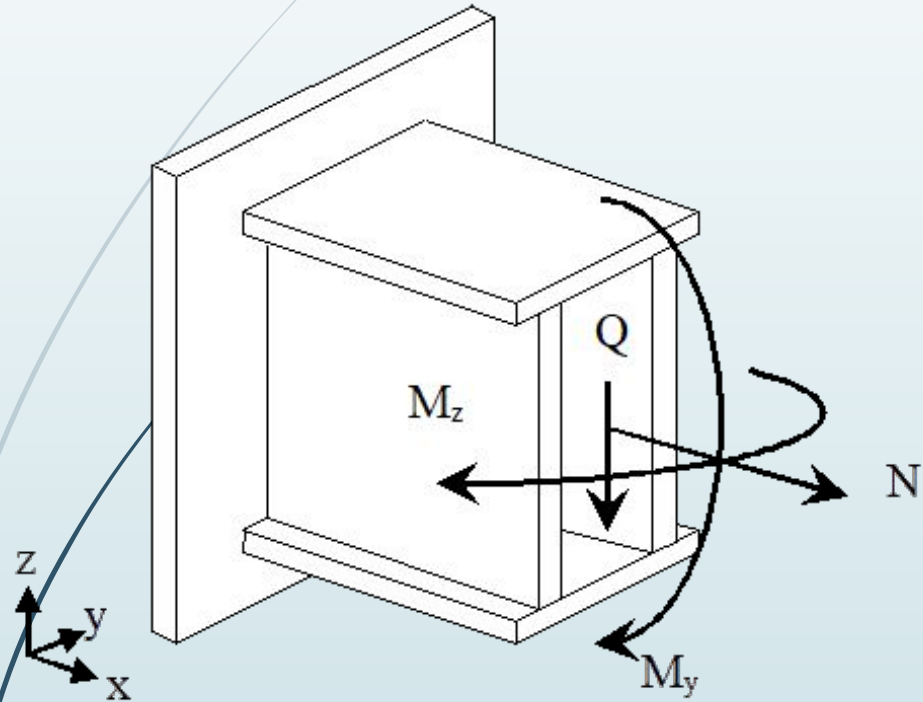
Поверхности среза на рисунках показаны красным. Ширина этих поверхностей k_{wf} и k_{wz} называется расчётным катетом, зависит от полноты шва и определяется по формулам:

$$k_{wf} = \beta_f \cdot k_f \text{ и } k_{wz} = \beta_z \cdot k_f, \text{ где}$$

β_f и β_z - [коэффициенты полноты шва](#), которые зависят от вида сварки, положения шва во время сварки, номинального катета шва.



Расчёт соединений с угловыми швами



При нагружении сварного соединения продольной и поперечной силами и моментами (см. рисунок слева) максимальные напряжения в сварных швах определяются по формулам:

$$\tau_f = \sqrt{\left(\frac{N}{A_f} + \frac{M_y}{W_{fy}} + \frac{M_z}{W_{fz}}\right)^2 + \left(\frac{Q}{A_{fq}}\right)^2} \text{ - для металла шва, и}$$

$$\tau_z = \sqrt{\left(\frac{N}{A_z} + \frac{M_y}{W_{zy}} + \frac{M_z}{W_{zz}}\right)^2 + \left(\frac{Q}{A_{zq}}\right)^2} \text{ - для границы сплавления}$$

где: N, Q, M_y, M_z – силовые факторы, действующие на сварной шов

A_f, A_z – суммарные площади среза всех сварных швов;

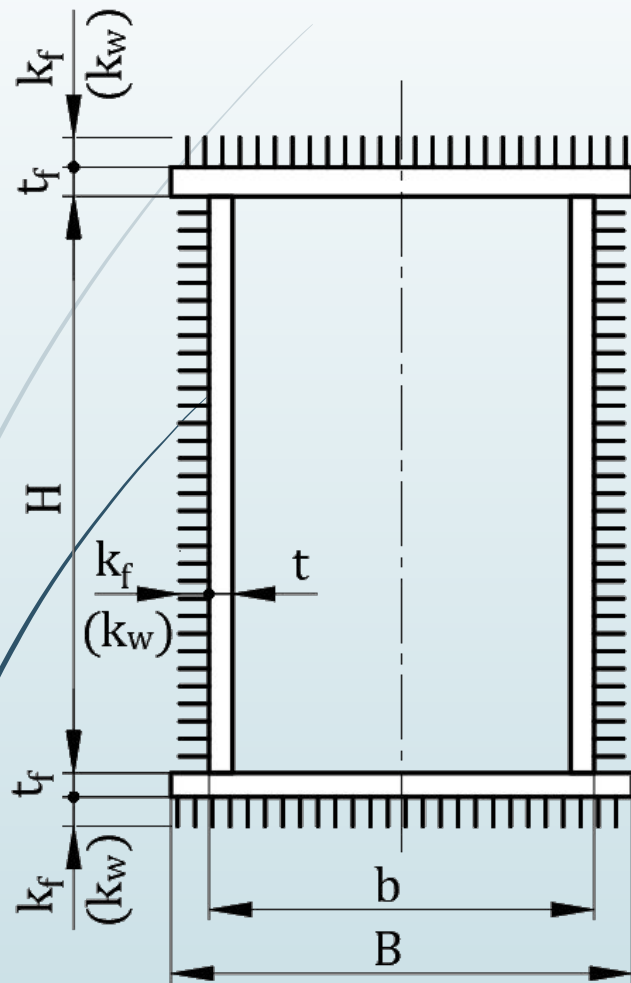
$W_{fy}, W_{fz}, W_{zy}, W_{zz}$ – моменты сопротивления площадей среза всех швов;

A_{fq}, A_{zq} – суммарные площади среза сварных швов, воспринимающих перерезывающую силу Q . При определении площадей A_{fq} и A_{zq} следует учитывать, что перерезывающую силу Q не воспринимают швы, расположенные перпендикулярно направлению её действия.



Расчёт соединений с угловыми швами

В качестве примера рассмотрим расчёт геометрических параметров фланцевого сварного соединения, показанного на предыдущем [рисунке](#). Схема сварных швов этого соединения показана на рисунке слева. Расчётные формулы – приведены ниже, в таблице.



суммарные
[ПЛОЩАДИ СРЕЗА](#) всех
сварных швов

МОМЕНТЫ
СОПРОТИВЛЕНИЯ
[ПЛОЩАДЕЙ СРЕЗА](#)
всех швов

суммарные
площади среза
сварных швов,
[ВОСПРИНИМАЮЩИХ](#)
[перерезывающую](#)
[силу](#)

$$W_{fy} = \frac{2 \cdot \left[\frac{k_{wf} \cdot h^3}{12} + \frac{B \cdot k_{wf}^3}{12} + B \cdot k_{wf} \cdot \left(\frac{h}{2} + t_f + \frac{k_{wf}}{2} \right)^2 \right]}{\left(\frac{h}{2} + t_f + k_{wf} \right)}$$

$$W_{zy} = \frac{2 \cdot \left[\frac{k_{wz} \cdot h^3}{12} + \frac{B \cdot k_{wz}^3}{12} + B \cdot k_{wz} \cdot \left(\frac{h}{2} + t_f + \frac{k_{wz}}{2} \right)^2 \right]}{\left(\frac{h}{2} + t_f + k_{wz} \right)}$$

$$W_{fz} = \frac{4 \cdot \left[\frac{k_{wf} \cdot B^3}{12} + \frac{h \cdot k_{wf}^3}{12} + h \cdot k_{wf} \cdot \left(\frac{b}{2} + \frac{k_{wf}}{2} \right)^2 \right]}{B}$$

$$W_{zz} = \frac{4 \cdot \left[\frac{k_{wz} \cdot B^3}{12} + \frac{h \cdot k_{wz}^3}{12} + h \cdot k_{wz} \cdot \left(\frac{b}{2} + \frac{k_{wz}}{2} \right)^2 \right]}{B}$$



Стандарты, применяемые при проектировании и конструировании сварных соединений

1. [ГОСТ Р ИСО 17659-2009](#) Сварка. Термины многоязычные для сварных соединений
- **Ручная дуговая сварка:**
 1. [ГОСТ 5264-80](#) Ручная дуговая сварка. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры.
 2. [ГОСТ 11534-75](#) Ручная дуговая сварка. Соединения сварные под острыми и тупыми углами. Основные типы, конструктивные элементы и размеры.
- **Сварка под флюсом:**
 1. [ГОСТ 8713-79](#) Сварка под флюсом. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры.
 2. [ГОСТ 11533-75](#) Автоматическая и полуавтоматическая дуговая сварка под флюсом. Соединения сварные под острыми и тупыми углами. Основные типы, конструктивные элементы и размеры.
- **Дуговая сварка в защитном газе:**
 1. [ГОСТ 14771-76](#) Дуговая сварка в защитном газе. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры.
 2. [ГОСТ 23518-79](#) Дуговая сварка в защитных газах. Соединения сварные под острыми и тупыми углами. Основные типы, конструктивные элементы и размеры.
- **Соединения сварные точечные:**
 1. [ГОСТ 14776-79](#) Дуговая сварка. Соединения сварные точечные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры.
 2. [ГОСТ 28915-91](#) Сварка лазерная импульсная. Соединения сварные точечные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры.



Значения коэффициента надёжности по назначению конструкции или её элемента (γ_n)

Вид повреждения	Последствия повреждения	
	значительные	незначительные
Прочность (ограничение пластических деформаций)	0,95	1,00
Устойчивость	0,90	0,95
Сопротивление усталости	0,95	1,00
Трещиностойкость	0,85	0,95



Значения коэффициента надёжности математической модели сварного соединения (γ_d)

Тип и метод расчёта	Тип сварного соединения	Напряжённое состояние	
		одноосное	многоосное
Проектный, аналитически ¹	стыковое (С)	0,80	0,70
Проектный, МКЭ ²	стыковое (С)	0,90	0,85
Проверочный, аналитически	стыковое (С)	0,90	0,80
Проверочный, МКЭ	стыковое (С)	0,95	0,90
Проектный, аналитически	тавровое (Т)	0,70	0,65
Проектный, МКЭ	тавровое (Т)	0,75	0,70
Проверочный, аналитически	тавровое (Т)	0,80	0,75
Проверочный, МКЭ	тавровое (Т)	0,90	0,85
Проектный, аналитически	нахлесточное (Н)	0,70	0,70
Проектный, МКЭ	нахлесточное (Н)	0,75	0,70
Проверочный, аналитически	нахлесточное (Н)	0,85	0,80
Проверочный, МКЭ	нахлесточное (Н)	0,95	0,90

Примечания:

1 аналитический расчёт – расчёт напряжений по формулам строительной механики;

2 МКЭ – расчёт напряжений методом конечных элементов (с применением КЭ программ – APM WinMachine, Ansys, Nastran и т.п.)



Нормативные и расчётные сопротивления сталей, применяемых для металлоконструкций перегрузочных машин

Марка стали	ГОСТ	Толщина, мм	Нормативное сопротивление, МПа		Расчётное сопротивление, МПа	
			R_{yn}	R_{un}	R_y	R_u
ВСтЗсп	14637-89	2...20	235	360	230	350
		20...40	225	360	220	350
09Г2С	19281-89 19282-73*	2...10	345	490	335	480
		10...20	325	470	315	460
		20...40	305	460	300	450
10ХСНД	19281-89 19282-73*	2...10	375	510	365	500
		10...20	355	490	345	480
		20...40	335	480	325	470



Нормативные и расчётные сопротивления металла швов сварных соединений с угловыми швами

Сварочные материалы		Нормативное сопротивление R_{wun} , МПа	Расчётное сопротивление R_{wf} , МПа*
Марка электрода по ГОСТ 9467-75*	Марка проволоки по ГОСТ 2246-70*		
Э42, Э42А	Св-08, Св-08А	410	180
Э46, Э46А	Св-08ГА	450	198
Э50, Э50А	Св-10ГА	490	216
Э60	Св-10НМА, Св-10Г2	590	240
Э70	Св-10ХГ2СМА, Св-08ХН2ГМЮ	685	279

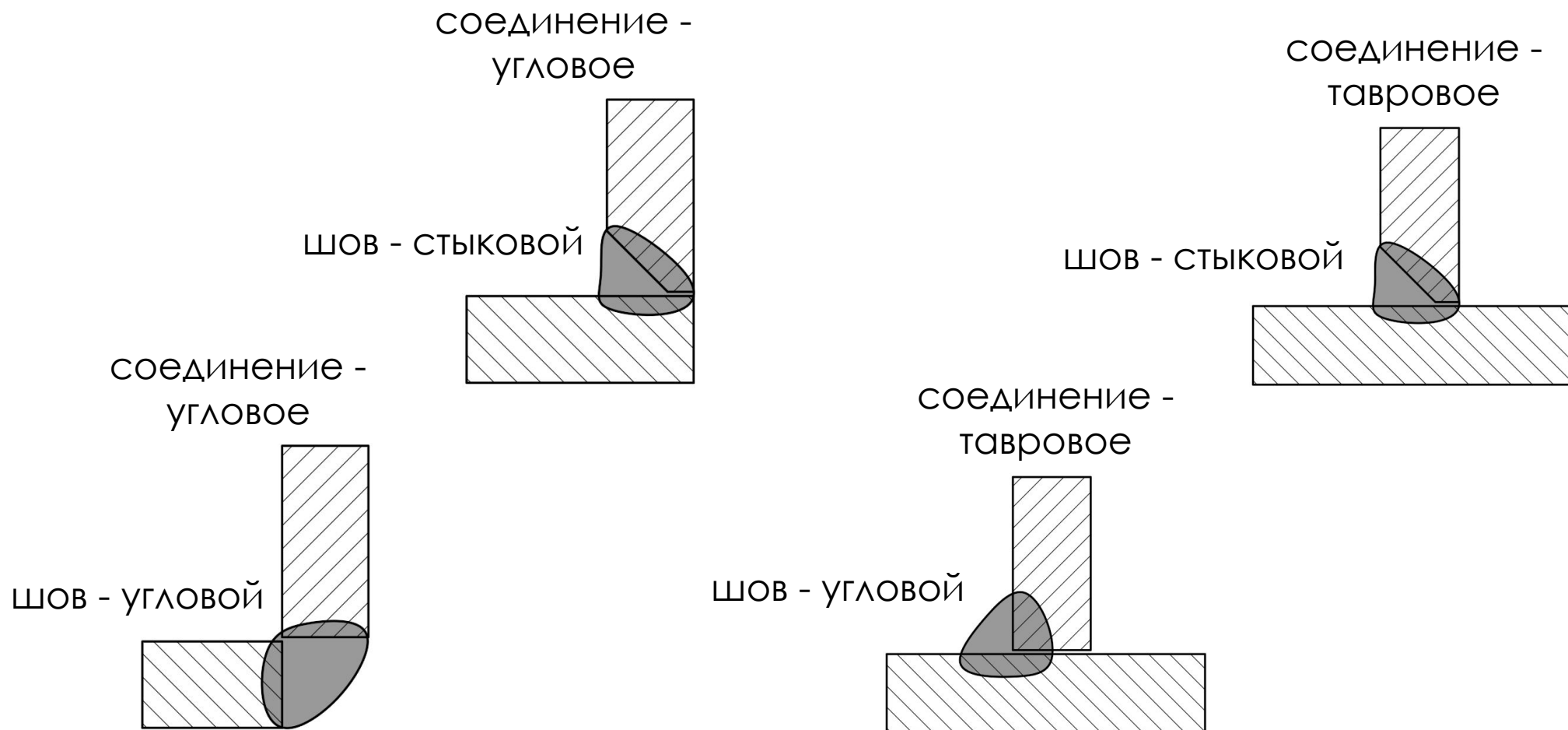


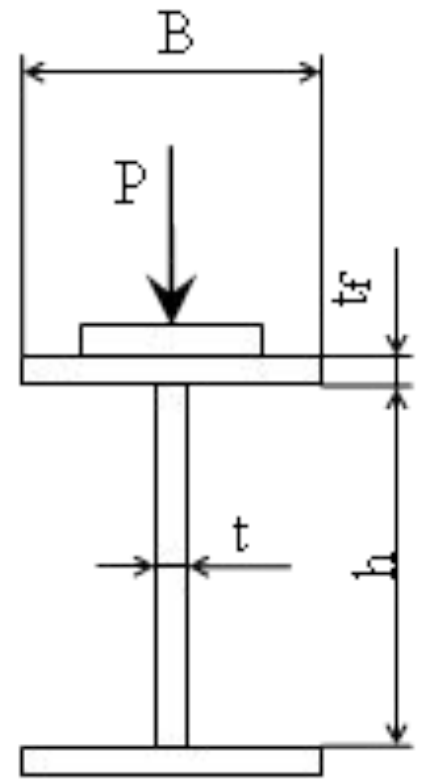
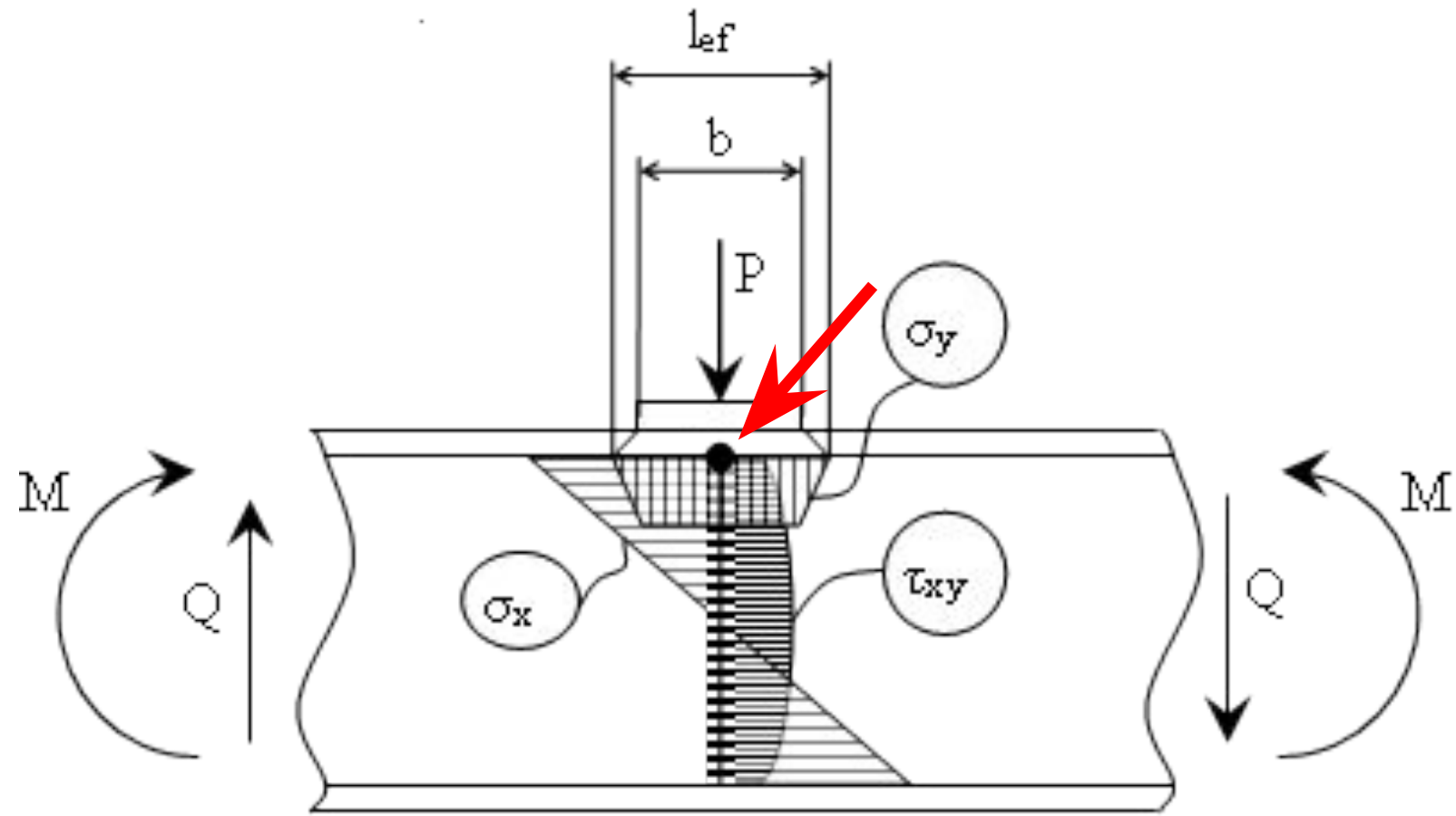
Коэффициенты полноты угловых сварных швов

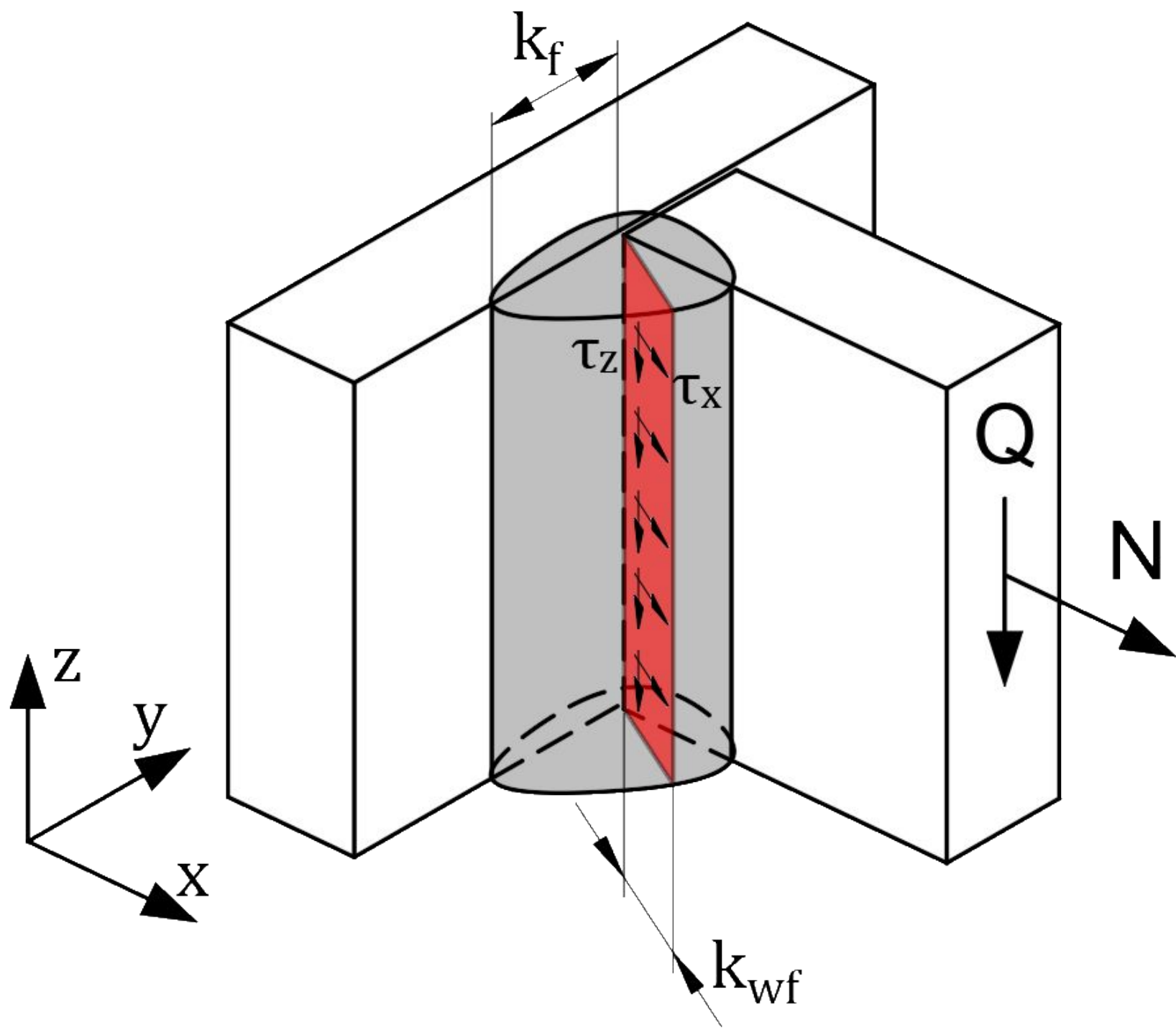
Вид сварки	Положение шва	Коэф- фициент	Значения коэффициентов при нормальных режимах сварки и катетах швов K_f			
			3...8	9...12	14...16	>16
Автоматическая при диаметре сварочной проволоки $d=3...5$ мм	В лодочку	β_f		1,1		0,7
		β_z		1,15		1,0
	Нижнее	β_f	1,1		0,9	0,7
		β_z	1,15		1,05	1,0
Автоматическая и механизированная при диаметре сварочной проволоки $d=1,4...2$ мм	В лодочку	β_f		0,9		0,8
		β_z		1,05		1,0
	Нижнее, горизонтальное, вертикальное	β_f	0,9		0,8	0,7
		β_z	1,05			1,0
Ручная и механизированная	В лодочку, нижнее, горизонтальное, вертикальное, потолочное	β_f			0,7	
		β_z			1,0	

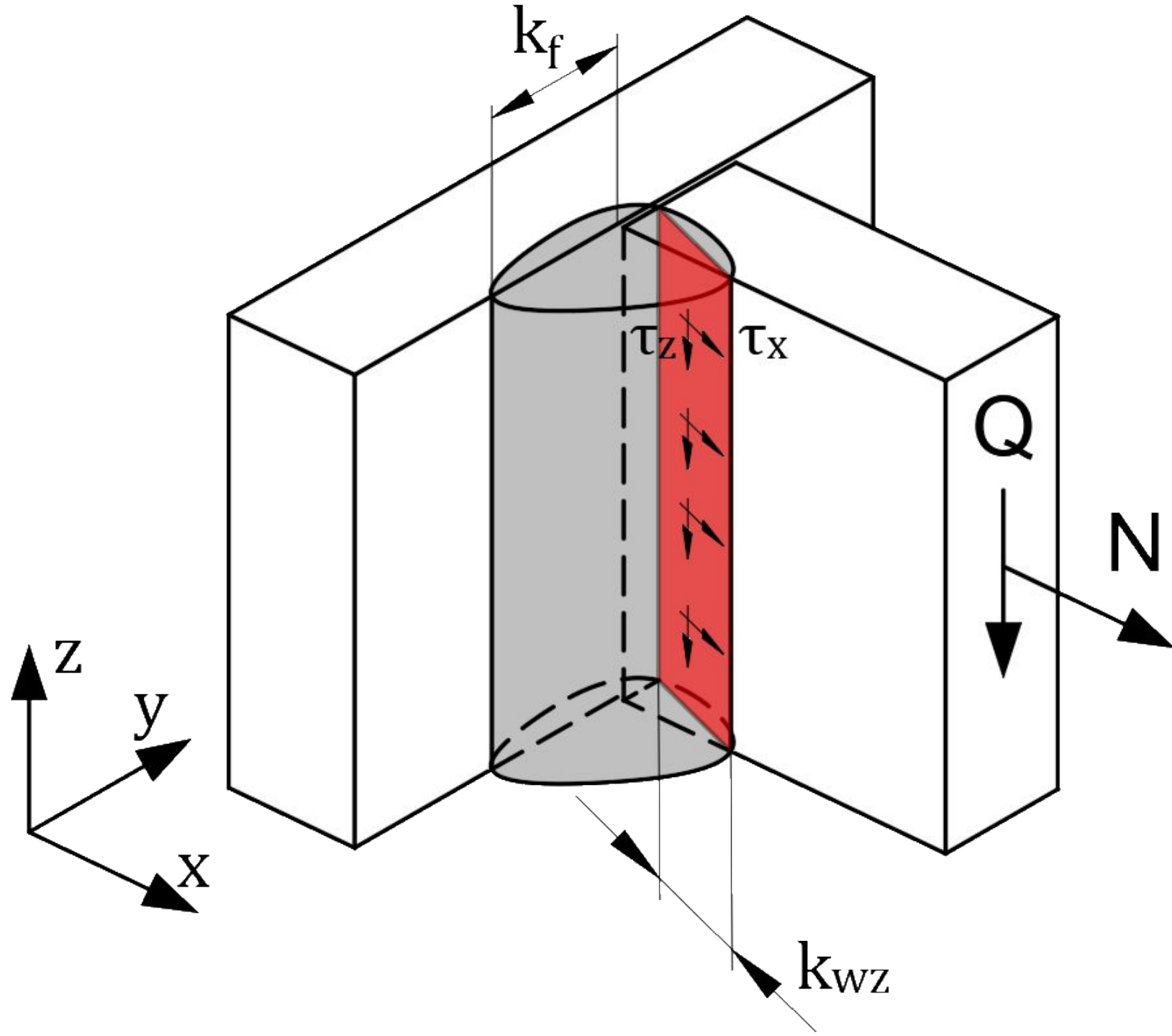


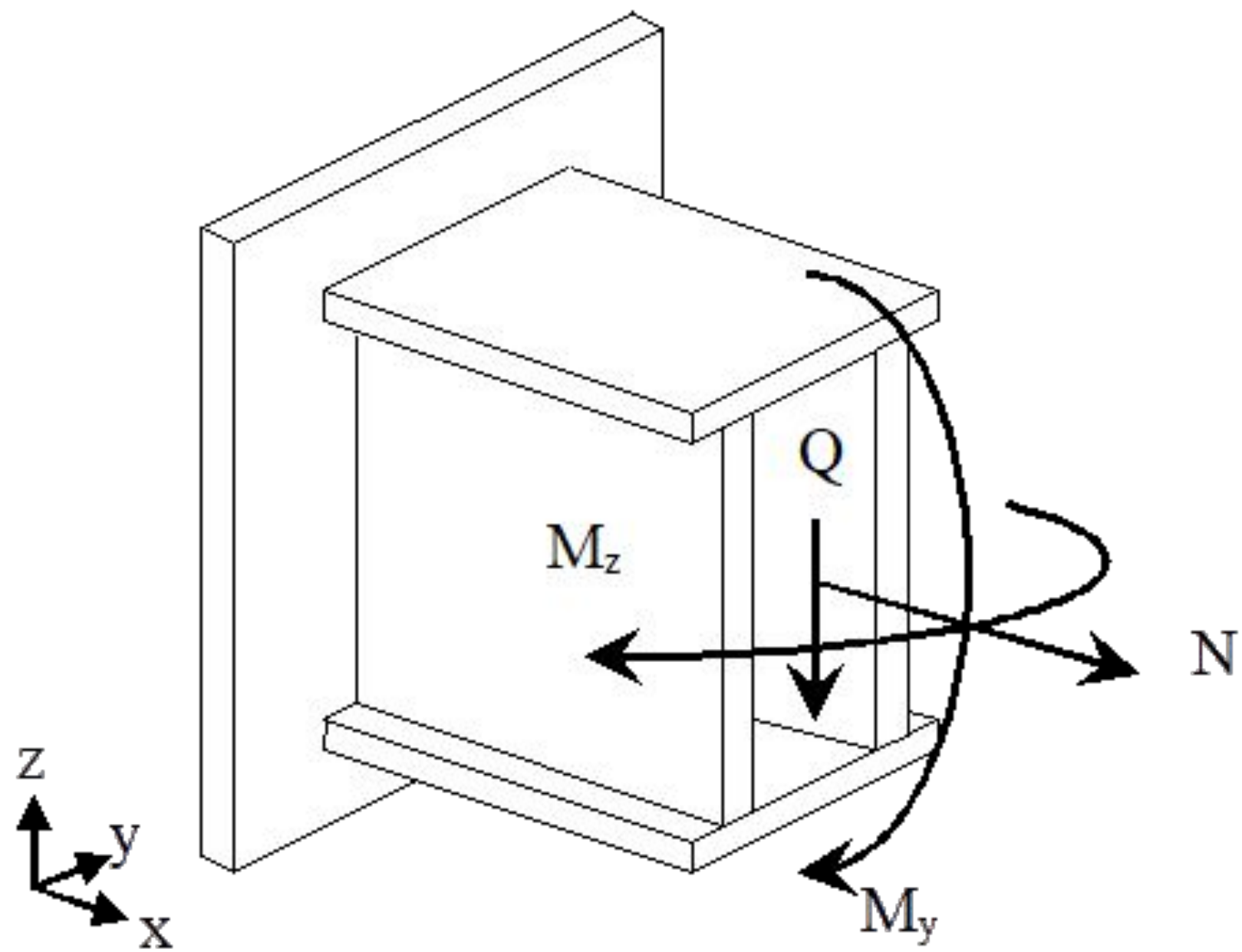
Следует понимать, что типы сварных соединений не всегда соответствуют типам сварных швов. Так, например, в угловом соединении может быть применён стыковой сварной шов.

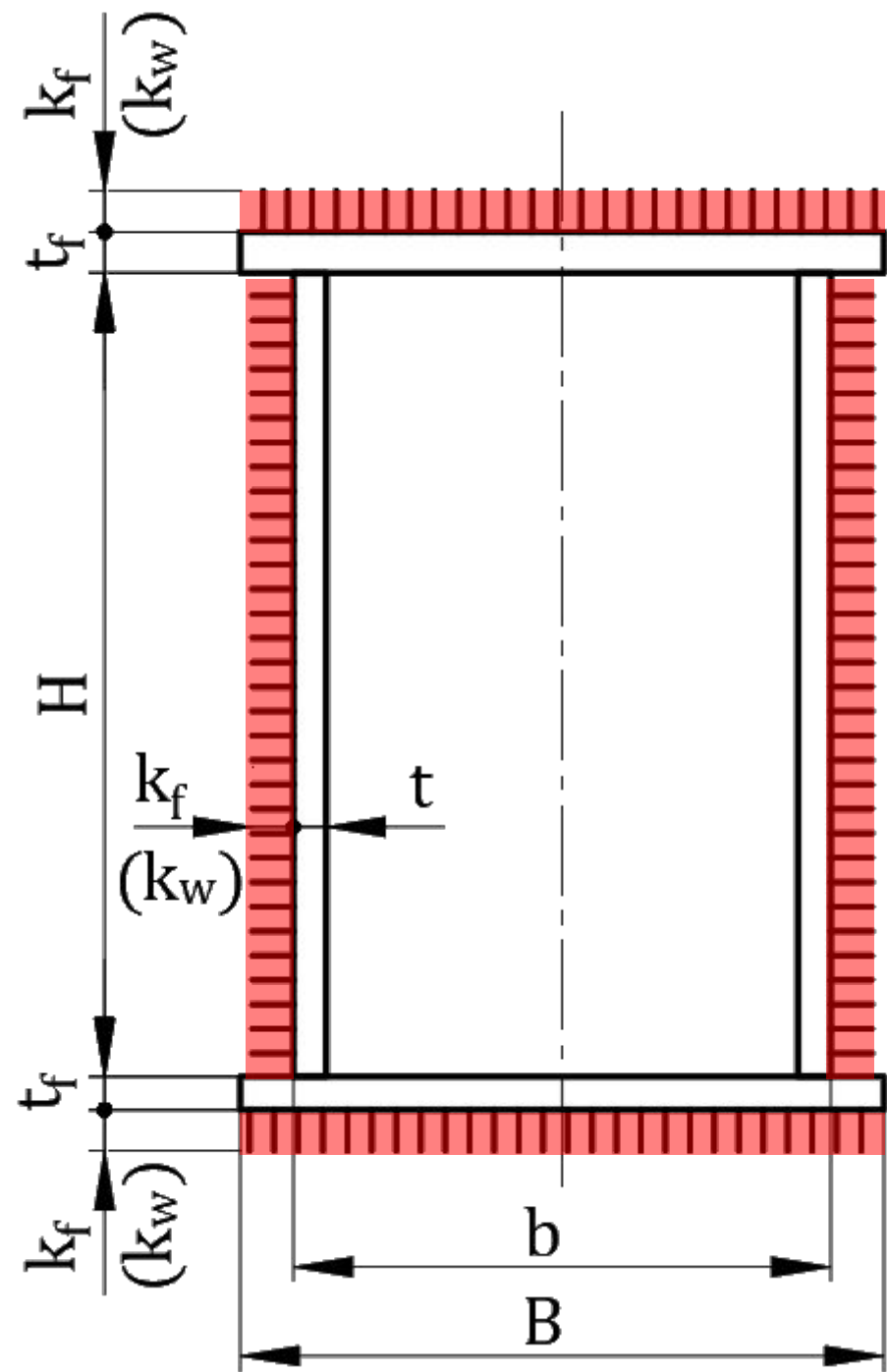


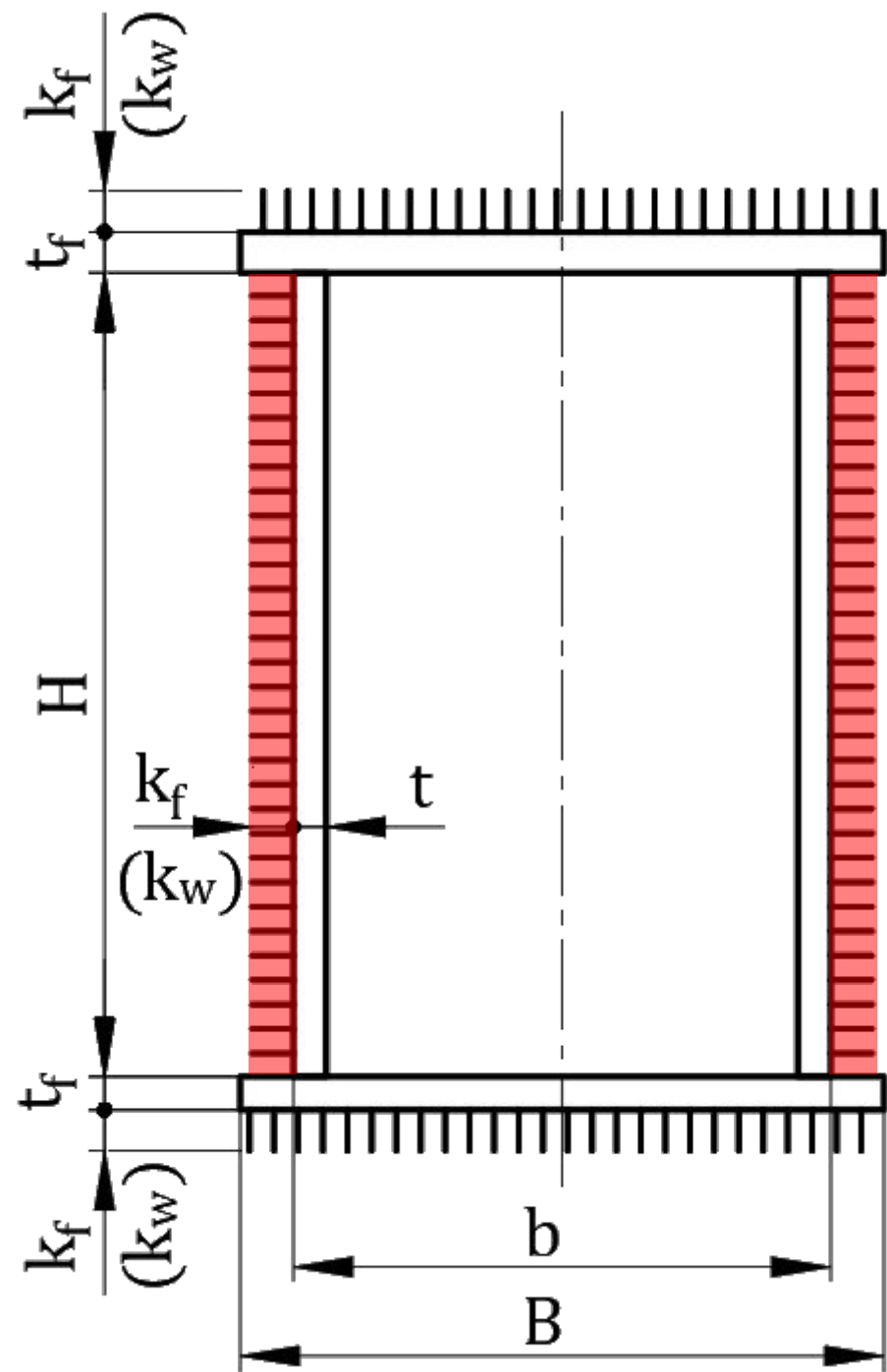












$$W_{fy} = \frac{2 \cdot \left[\frac{k_{wf} \cdot h^3}{12} + \frac{B \cdot k_{wf}^3}{12} + B \cdot k_{wf} \cdot \left(\frac{h}{2} + t_f + \frac{k_{wf}}{2} \right)^2 \right]}{\left(\frac{h}{2} + t_f + k_{wf} \right)}$$

$$W_{fz} = \frac{4 \cdot \left[\frac{k_{wf} \cdot B^3}{12} + \frac{h \cdot k_{wf}^3}{12} + h \cdot k_{wf} \cdot \left(\frac{b}{2} + \frac{k_{wf}}{2} \right)^2 \right]}{B}$$

$$W_{zy} = \frac{2 \cdot \left[\frac{k_{wz} \cdot h^3}{12} + \frac{B \cdot k_{wz}^3}{12} + B \cdot k_{wz} \cdot \left(\frac{h}{2} + t_f + \frac{k_{wz}}{2} \right)^2 \right]}{\left(\frac{h}{2} + t_f + k_{wf} \right)}$$

$$W_{zz} = \frac{4 \cdot \left[\frac{k_{wz} \cdot B^3}{12} + \frac{h \cdot k_{wz}^3}{12} + h \cdot k_{wz} \cdot \left(\frac{b}{2} + \frac{k_{wz}}{2} \right)^2 \right]}{B}$$

