ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
Кафедра «Машины и автоматизация сварочного производства»

Расчет и проектирование сварных конструкций

(РПСК)

Доцент, к.т.н
Чероногоров
Анатолий Лаврович

2022 г

Для самостоятельной подготовки по дисциплине «Проектирование сварных конструкций» рекомендуется следующая литература:

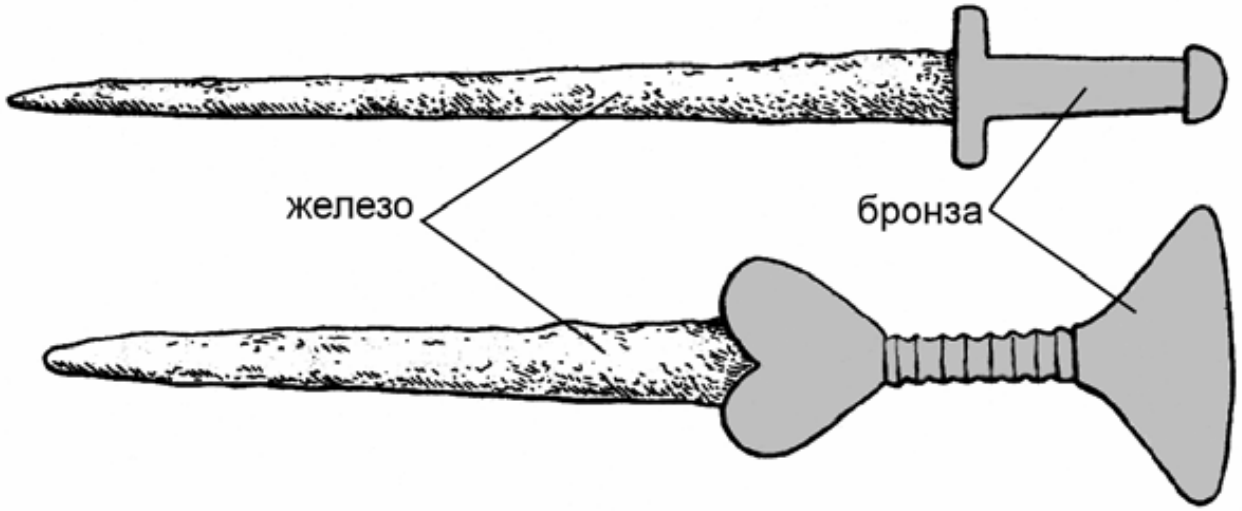
1. Лукьянов В.Ф. Проектирование сварных соединений, работающих в условиях действия статических нагрузок. Издательский Центр ДГТУ, Ростов н/Д, 2012г
2. Николаев Г.А., Винокуров В.А. Сварные конструкции. Расчет и проектирование Издательство: Высшая школа Год: 1990 с 446.
3. Прочность сварных соединений при переменных нагрузках / [В.И.Труфяков, В. И. Дворецкий, П.П.Михеев и др.]; Под ред. В.И.Труфякова. - Киев: Наукова думка, 1990. - 255 с.
4. Лукьянов В.Ф., Харченко В.Я., Людмирский Ю.Г. Изготовление сварных конструкций в заводских условиях. Издательство Феникс Ростов н/Д, 2009
5. Компьютерное проектирование и подготовка производства сварных конструкций / Под ред. С.А. Куркина и В.М. Ховова – М: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002, - 463 с

Содержание курса

- Цели и задачи курса.
- Конструкционные материалы сварных конструкций.
- Типы сварных соединений
- Механические характеристики сварных соединений. Методы испытаний.
- Локальное напряженное состояние сварных соединений
- Собственные напряжения и деформации в сварных соединениях
- Проектирование сварных соединений, работающих при статических нагрузках.
- Расчет соединений
- Влияние дефектов сварных соединений
- Прочность сварных соединений при переменных нагрузках

История развития сварных конструкций

Биметаллический сварной меч (VIII – VII вв. до н.э)



1735 г. - академик Российской академии наук Г.В. Рихман:

• выполнил ряд исследований атмосферного электричества;

• впервые высказал мысль о возможности практического применения «электрических искр» для плавления металлов.

Академик В.В. Петров

- Впервые в мире открыл электрическую дугу 1802 г.
- Идея практического применения дуги

1812 г. - английский ученый-химик Г. Дэви,
независимо от В.В. Петрова, открыл и назвал «дугой» электрический разряд.

1849 г. - американец К. Стэт
патент на соединение металлов с помощью электричества
(не был реализован на практике)

Русский изобретатель Н.Н. Бенардос (1842 - 1905)

- Применил электрическую дугу для соединения и резки сталей (1882 г.)
- Основные виды электроконтактной сварки – точечную и роликовую

✓Общество «Электрогефест» (1881 г.)
✓Патент на изобретение способа дуговой сварки «Электрогефест» во Франции, Англии, Германии

Русский инженер Н.Г. Славянов (1854 - 1897):

- 1888 г. предложил дуговую сварку плавящимся металлическим электродом
- Первый в мире автомат дуговой сварки плавящимся электродом
- Разработал научные основы дуговой сварки;
- Применил флюс для защиты сварочной ванны
- предложил наплавку и сварку чугуна
- изготовил сварочный генератор
- организовал первый в мире электросварочный цех в Пермских пушечных мастерских;

- Кислородно-ацетиленовая горелка –
  инженер Фуше, Франция, 1903 г.

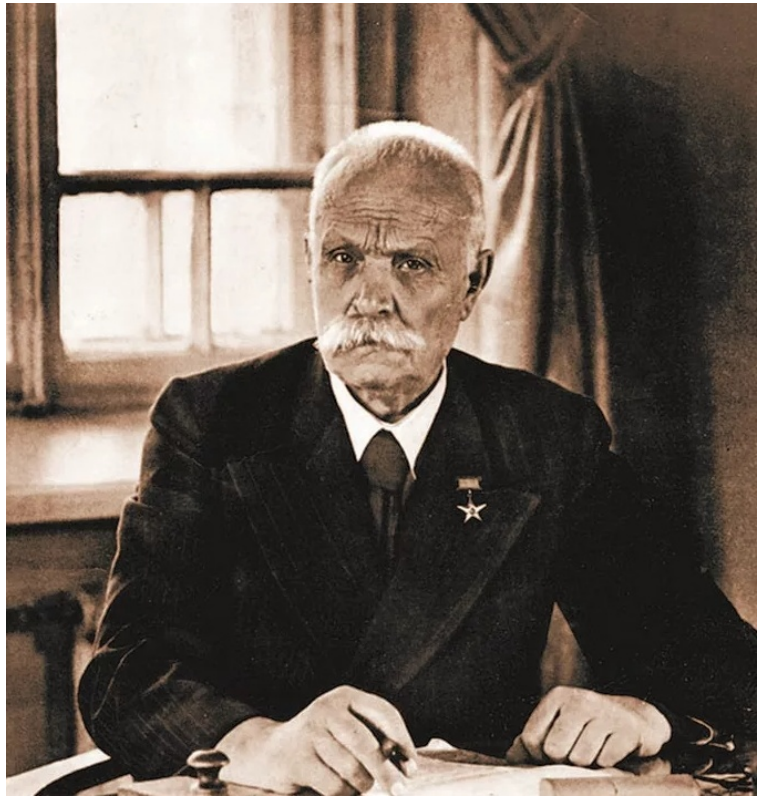
- Плавучая сварочная мастерская для ремонта судов
  ESAB-IV, Швеция, 1907 г.

- Кислородно-ацетиленовая сварка трубопроводов
  США (Филадельфия), 1911 г.

- Точечная сварка для соединения деталей автомобиля
  США, 1912

- Дуговая сварка в судостроении
  морской регистр Лойда, 1918 г.

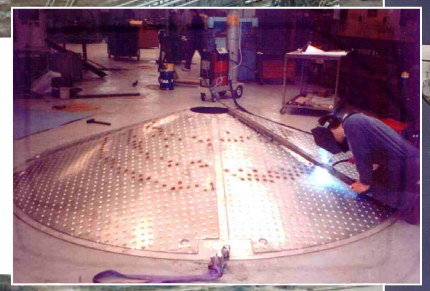
- Автоматическая сварка под флюсом Е. О. Патона, 1930 г.

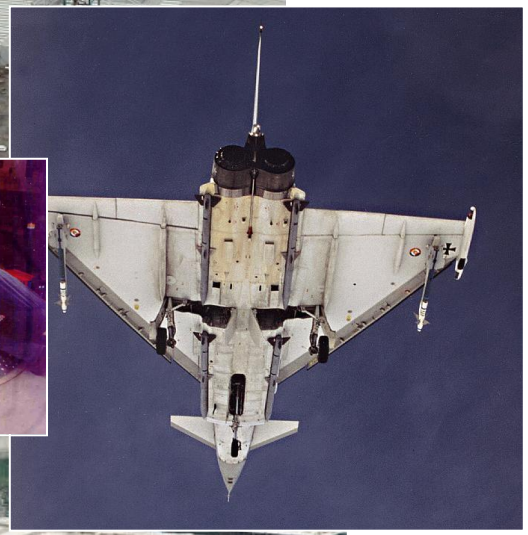


- Сварка в космосе (плазменно-дуговая и ручная дуговая плавящимся электродом) космонавты Г.С. Шонин и В.Н. Кубасов, 1969 г.

Примеры сварных конструкции

Более половины валового национального продукта промышленно развитых стран создается с помощью сварки.

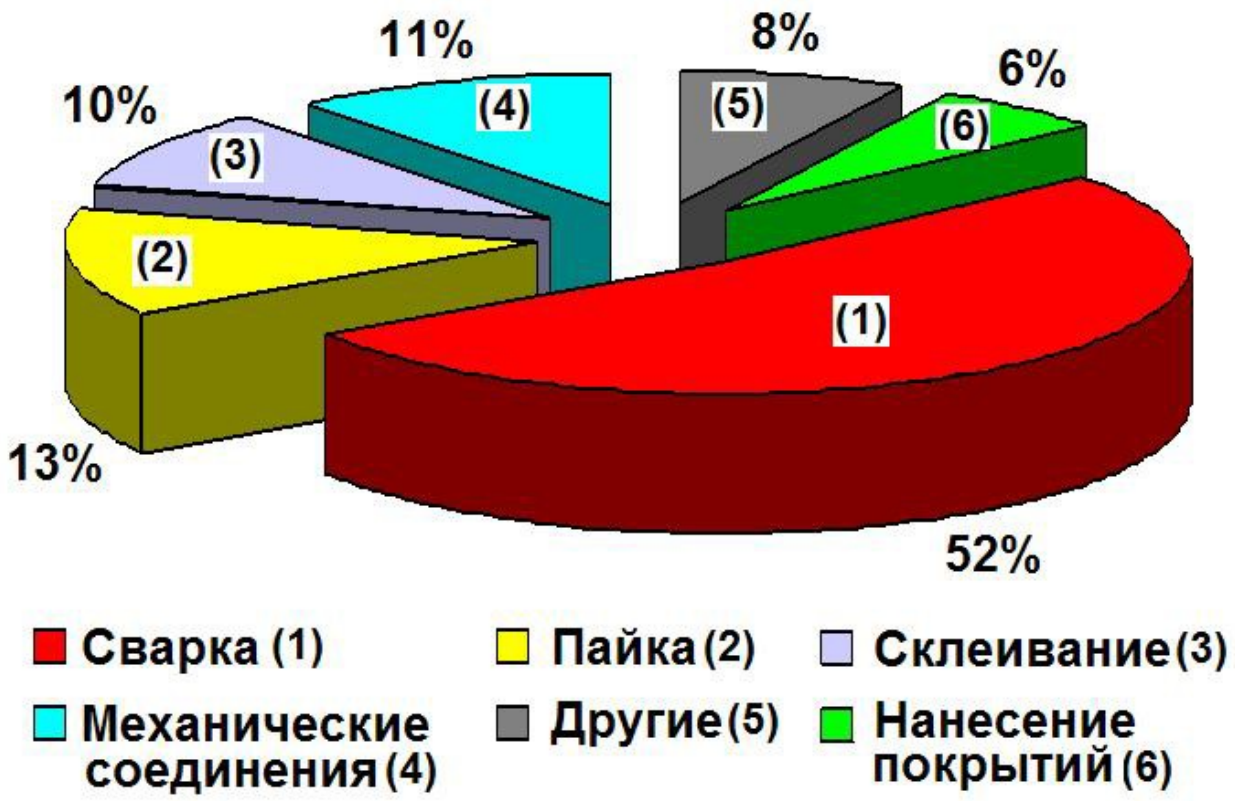




Сваркой в мире занято не менее 5 млн. человек.

В России
объем сварных конструкций
достигает 800 млн. т.

Доля способов соединения деталей



Основные направления применения сварки

- Обеспечение возможности получения крупных конструкций из мелких компонентов;
- Соединение материалов с различными свойствами в одной конструкции;
- Ремонт и восстановление отдельных участков конструкций;
- Снижение трудоемкости изготовления конструкции

В мире проложено около 1 млн. км сварных газопроводов.

Протяженность трубопровода (Аляска, 1975 г.) – 798 миль, диаметр – 1220 мм. Сварено 38 000 сварных стыков. Было занято 17 000 человек – 6% населения Аляски.

Россия имеет 13% мирового запаса нефти и 45% запаса газа
Длина магистральных трубопроводов достигла 215 тыс. км.
Промысловые - около 300 тыс. км

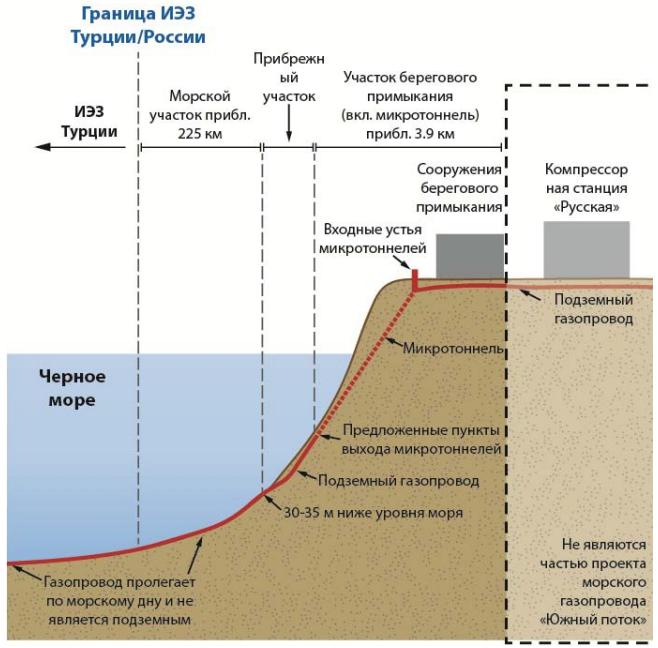
В 2002 г. завершено строительство газопровода «Голубой поток»

Сухопутная часть трубопровода: длина – 1140 км, диаметр – 1220 мм.

По дну Черного моря проложено две нитки.

Протяженность каждой нитки морской части – 396 км.

Морской газопровод «**Южный поток**»
Четыре линии трубопроводов диаметром 813 мм (толщиной 39 мм) протяженностью примерно 930 км.



7 декабря 2012 года

Сварка первого стыка

Пуск газопровода «Сила Сибири»
01.09.14

Этапы проектирования сварных конструкций

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО

ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ГОСТ Р ИСО 9001— 2015

СИСТЕМЫ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА

Требования

ISO 9001:2015
Quality management systems — Requirements
(IDT)

8.3 Проектирование и разработка продукции и услуг

8.3.1 Общие положения

Организация должна разработать, внедрить и поддерживать процесс проектирования и разработки, подходящий для обеспечения последующего производства продукции или предоставления услуги.

8.3.2 Планирование проектирования и разработки

8.3.3 Входные данные для проектирования и разработки

Организация должна определить требования, имеющие важное значение для конкретного вида проектируемых и разрабатываемых продукции и услуг. Организация должна рассмотреть:

a) функциональные и эксплуатационные требования;

b) информацию, полученную из предыдущей аналогичной деятельности по проектированию и разработке;

c) законодательные и нормативные правовые требования;

d) стандарты или своды практик, которые организация обязалась применять;

e) возможные последствия неудачи, связанные с характером продукции и услуг.

Входные данные должны быть адекватны целям проектирования и разработки, а также быть полными и непротиворечивыми.

Противоречия входных данных проектирования и разработки должны быть разрешены.

Организация должна регистрировать и сохранять документированную информацию по входным данным проектирования и разработки.

8.3.5 Выходные данные проектирования и разработки

Организация должна обеспечить, чтобы выходные данные проектирования и разработки:

a) соответствовали входным требованиям;

b) были адекватными для последующих процессов производства продукции и предоставления услуг;

c) содержали требования к мониторингу и измерению, насколько это подходит, а также критерии приемки или ссылки на них;

d) определяли характеристики продукции и услуг, которые имеют важное значение для их целевого назначения, безопасного и надлежащего предоставления.

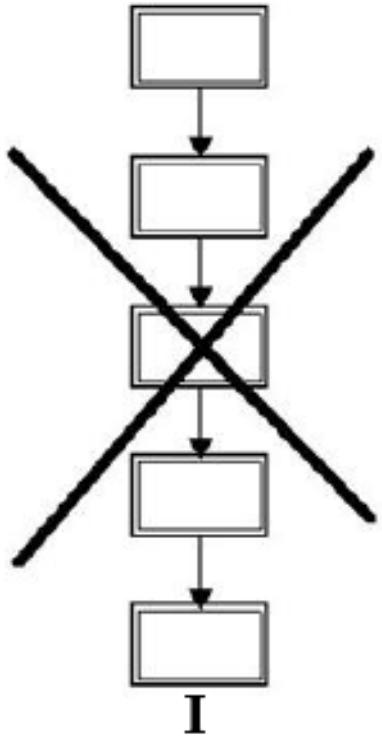
Организация должна регистрировать и сохранять документированную информацию по выходным данным проектирования и разработки.

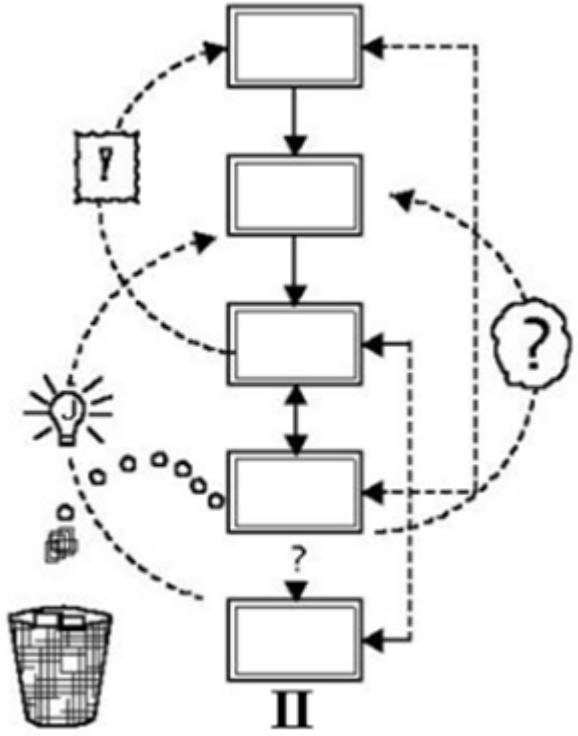
8.3.6 Изменения проектирования и разработки

Этапы проектирования

- Основные размеры и компоновка элементов конструкции;
- Место расположения и нагрузки сварных швов;
- Тип сварного соединения и способ сварки;
- Расчет размеров сварных швов при статических нагрузках;
- Анализ локального напряженного состояния в районе сварных соединений;
- Расчет сварных соединений на усталость и сопротивление хрупкому разрушению, оценка воздействия коррозионной среды;
- Влияние сварочных напряжений и деформаций
- Требования к точности конструкции и качеству сварных соединений;
- Анализ технологичности конструкции.

СТРАТЕГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ





Стадии проектирования конструкторской документации изделия

Техническое задание

- Наименование изделия
- Назначение и условия работы
- Технические требования
- Экономические показатели
- Данные об аналогичных изделиях

Техническое предложение

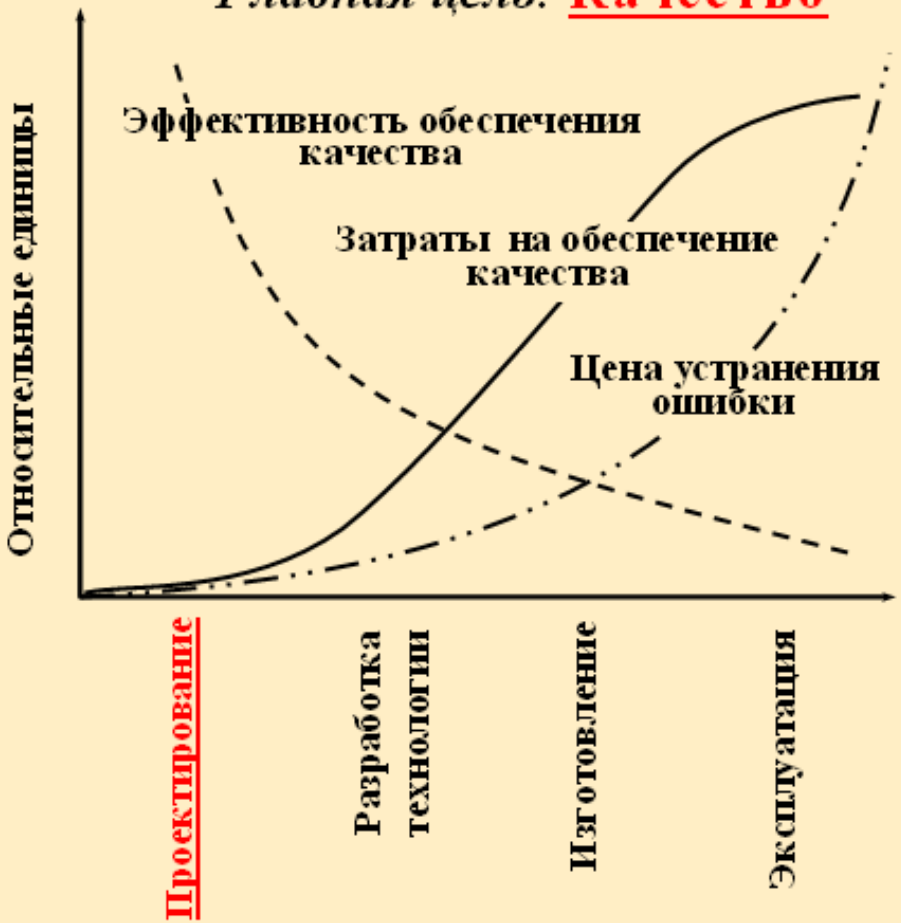
- анализ ранее созданных моделей и их конструкций (анализ моделей-аналогов);
- разработка вариантов конструктивного решения проектируемого изделия в целом и его отдельных элементов (разработка моделей-предложений).
- обоснование целесообразности проекта (оценка моделей-предложений).

Эскизный проект

(ГОСТ 2.119–73) – это совокупность конструкторских документов, которые должны содержать принципиальные конструктивные решения, дающие общее представление об устройстве изделия, а также данные, определяющие назначение, основные параметры и размеры разрабатываемого изделия

Задачи, решаемые при проектировании сварных соединений

Главная цель: **Качество**



1. Прочность:

Конструкция должна выдерживать заданную нагрузку без разрушения и появления недопустимых деформаций

2. Надежность:

Конструкция должна обеспечивать безотказную работу в течении заданного периода времени с заданной вероятностью

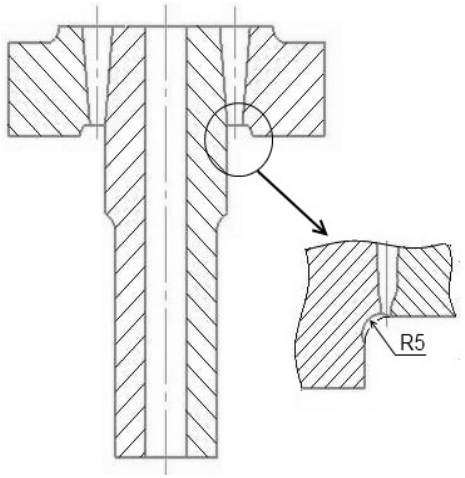
3. Технологичность:

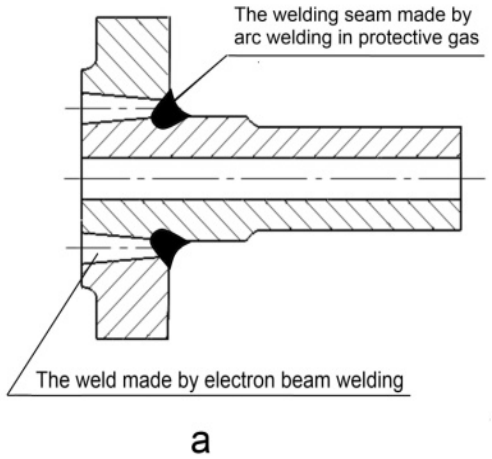
Обеспечение экономичности при изготовлении без снижения показателей качества, прочности, надежности

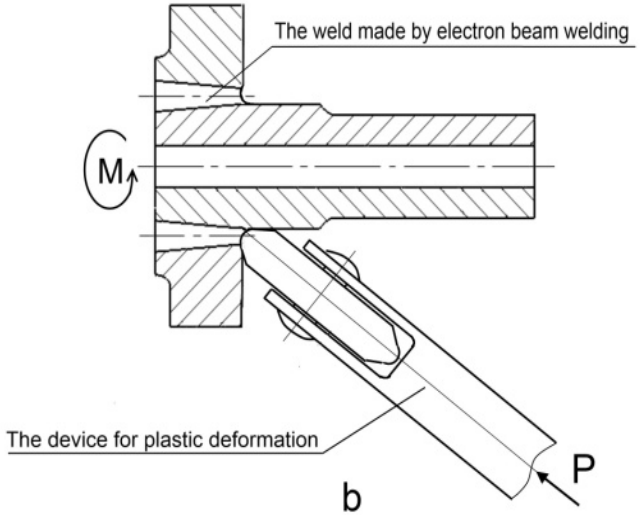
4. Специальные:

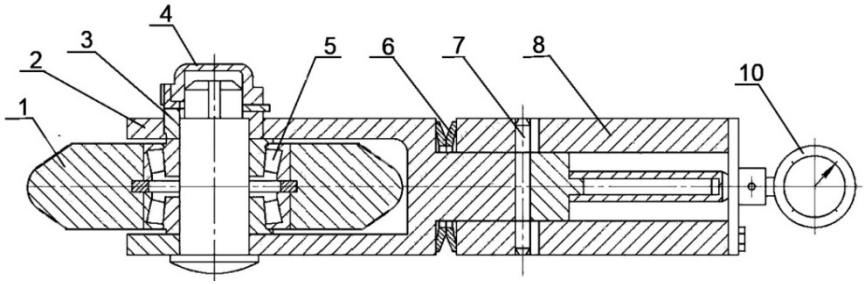
Внешний вид конструкции; точность; коррозионная стойкость; теплостойкость; хладостойкость и др.

Конструктивно-технологическая модернизация ступиц вариатора







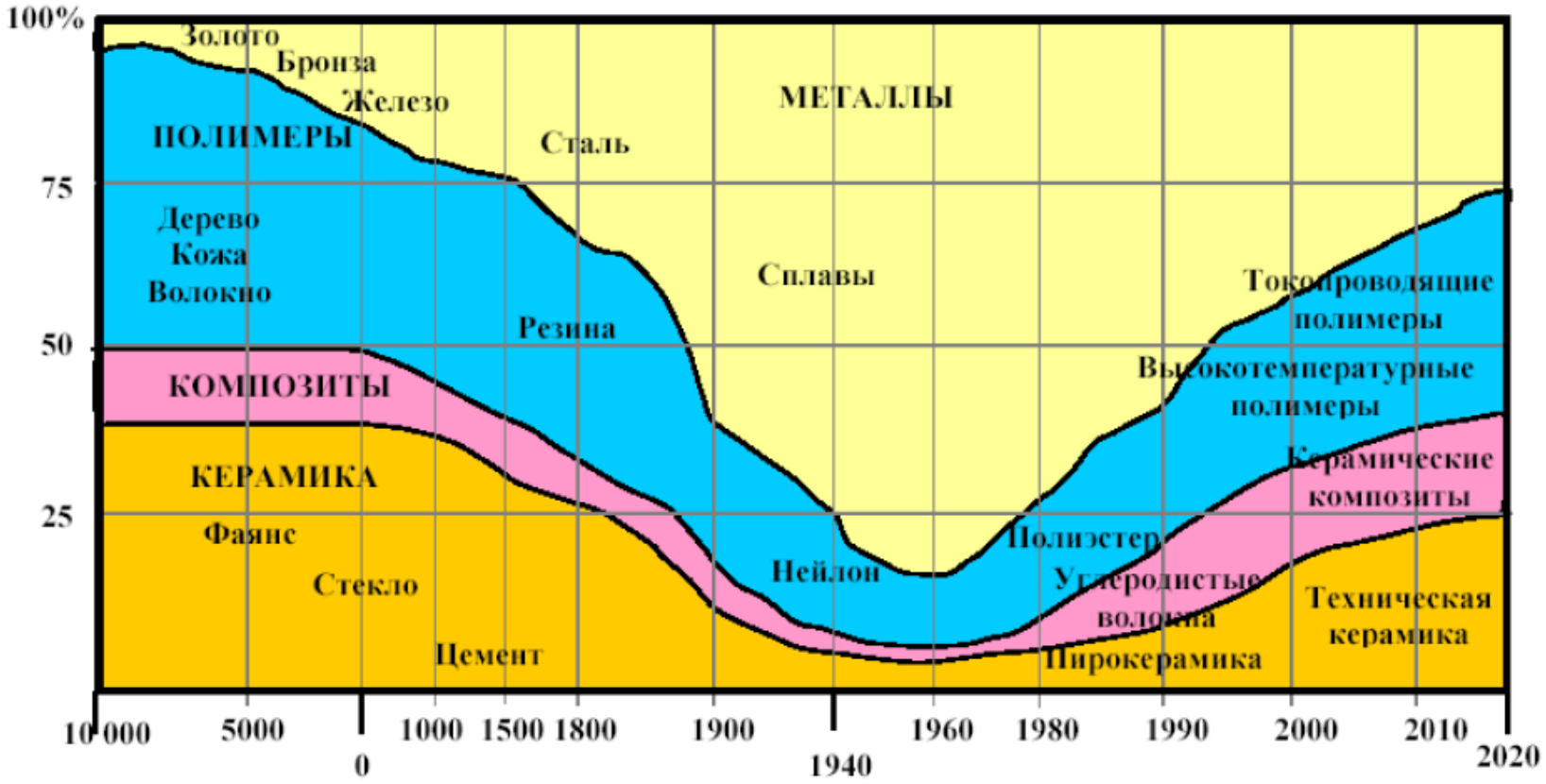


Конструкционные материалы сварных конструкций

Характеристики конструкционных материалов

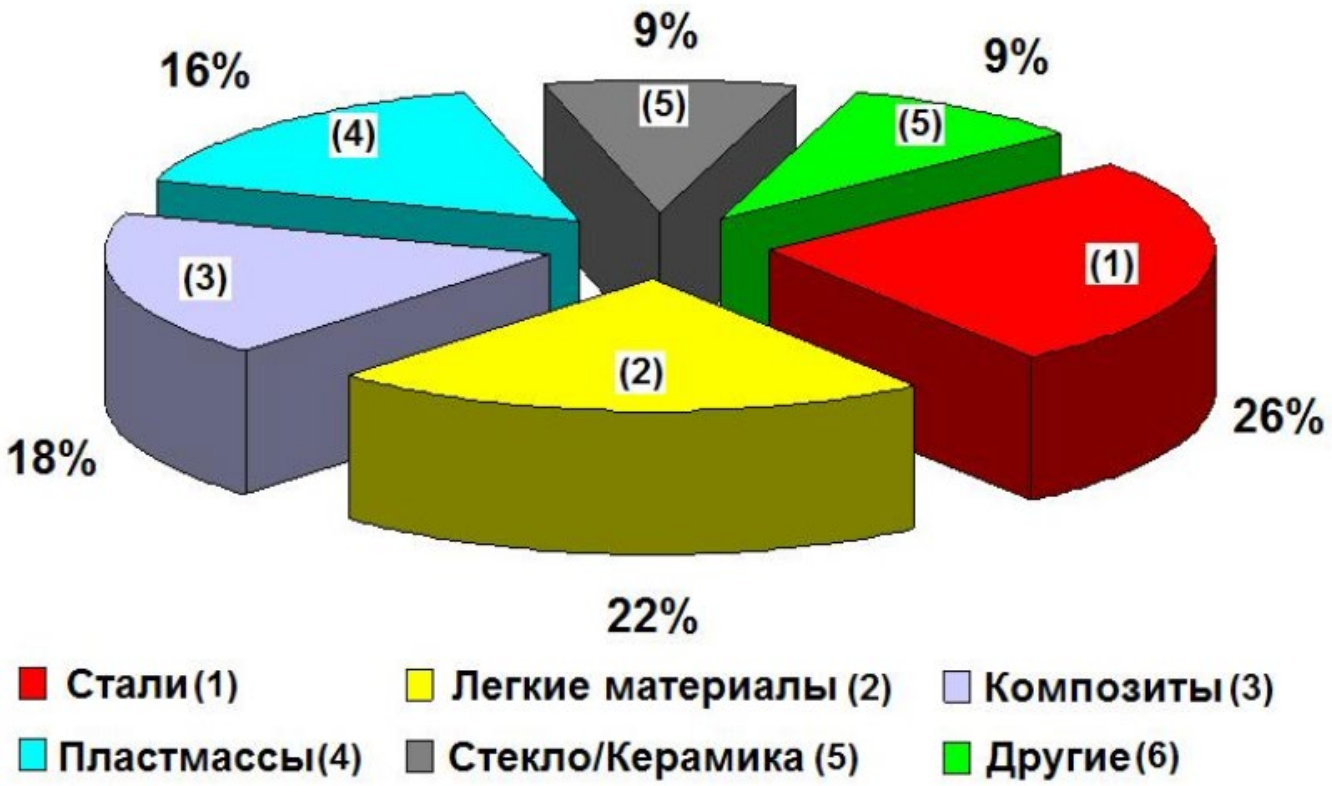
1. Прочность
2. Пластичность
3. Технологичность
4. Стоимость

Тенденции применения конструкционных материалов

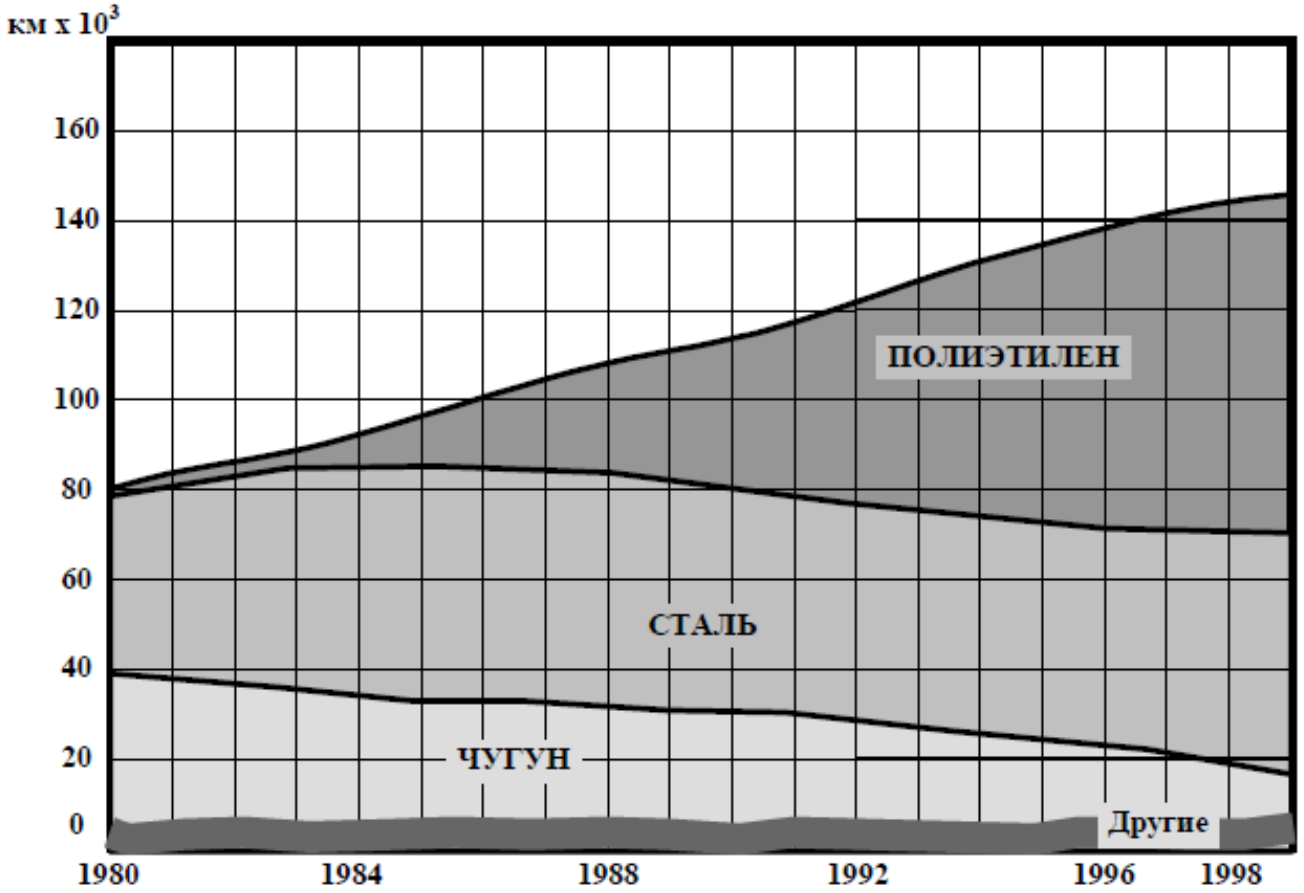


Относительный объем применения конструкционных материалов

(по данным Немецкого сварочного общества)



Материалы применяемые для трубопроводов (Франция)



Возможности освоения океанских глубин аппаратами из различных материалов

Сталь ρ = 7,8 г/см3

1. $б_{02}$ = 780 МПа,
2. $б_{02}$ = 840 МПа
3. $б_{02}$ = 1400 МПа

Титановый сплав ρ = 4,5 г/см3

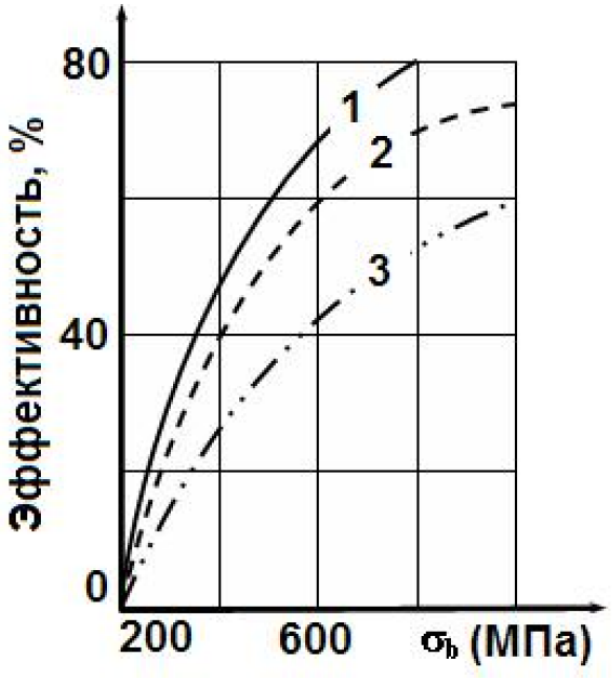
4. $б_{02}$ = 840 МПа
5. $б_{02}$ = 1050 МПа

Металлические конструкционные материалы

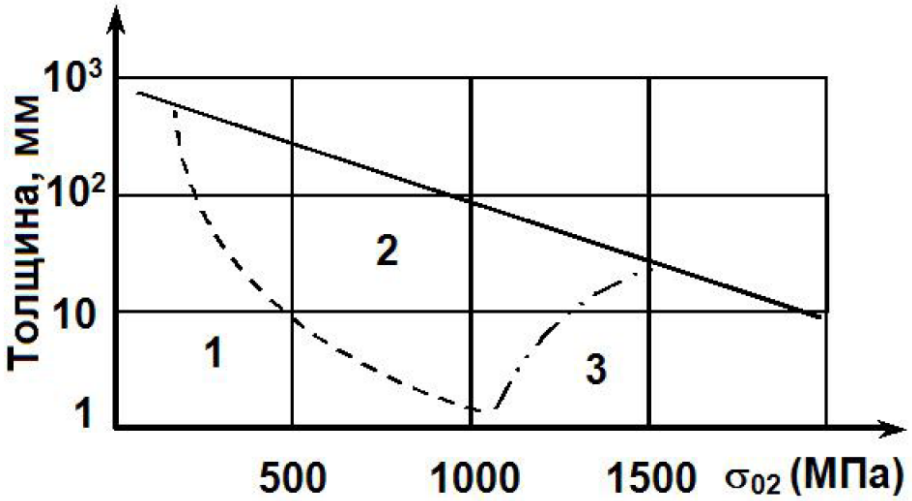
Удельная прочность сварных соединений различных групп металлических конструкционных материалов

Группа материалов	Теоретическая прочность (МПа)	Модуль упругости (МПа)	Предел прочности (МПа)	Плотность (г/см3)	Удельная прочность (м)
Сплавы на основе железа	14 000	$2,1*10^5$	1 050	7,8	$1,35 *10^4$
Алюминиевые сплавы	4 200	$0,7*10^5$	520	2,7	$1,9 *10^4$
Титановые сплавы	9 000	$1*10^5$	1 400	4,5	$3,1 *10^4$

Ограничения на использование высокопрочных сталей



1. Растяжение
2. Изгиб
3. Сжатие

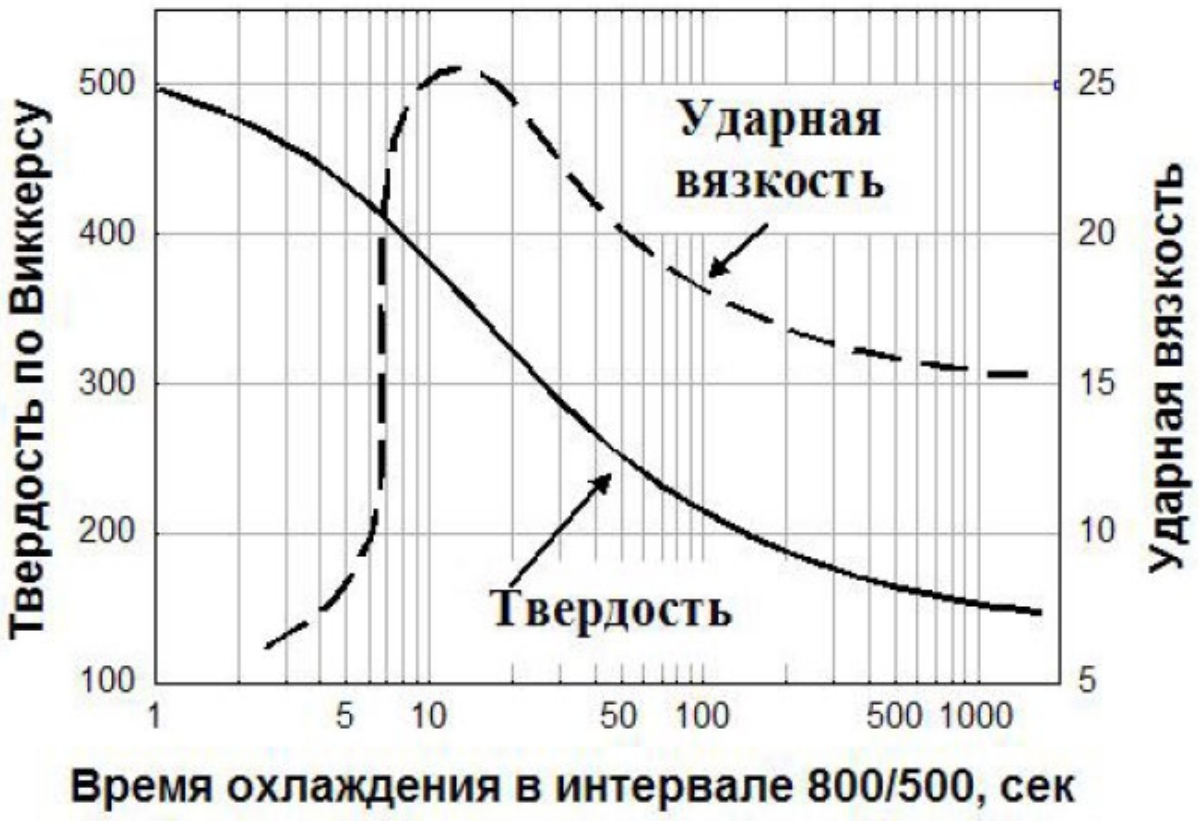


1 - сварка возможна без подогрева и термообработки

2 - требуется подогрев при сварке и последующая термообработка

3 - требуется закалка и отпуск после сварки

Влияние скорости охлаждения на механические свойства сварного соединения



Влияние легирующих элементов

$$C_{экв} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Cu + Ni}{15} \quad (IIW)$$

$$C_{экв} = C + \frac{Mn}{20} + \frac{Cr + Mo + V}{10} + \frac{Ni}{15} \quad (TWI)$$

$C_{экв} < 0,46\%$

$$HCS = \frac{C(S + P + Si/25 + 0,01Ni)10^3}{3Mn + Cr + Mo + V}$$

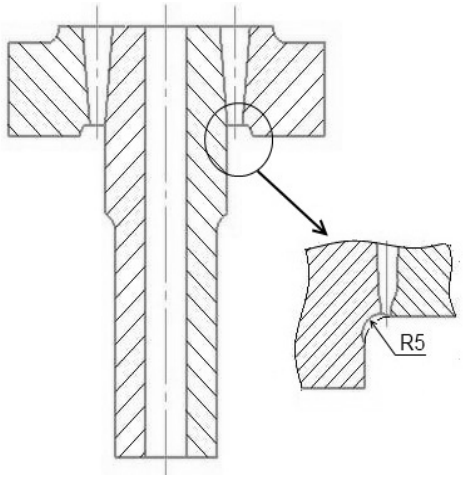
$б_в < 700$ МПа HCS < 4

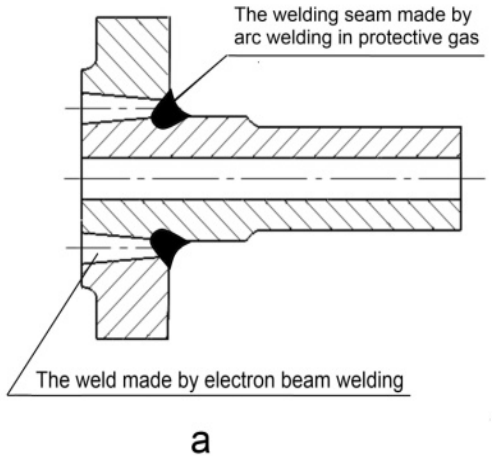
$б_в > 700$ МПа HCS < 2

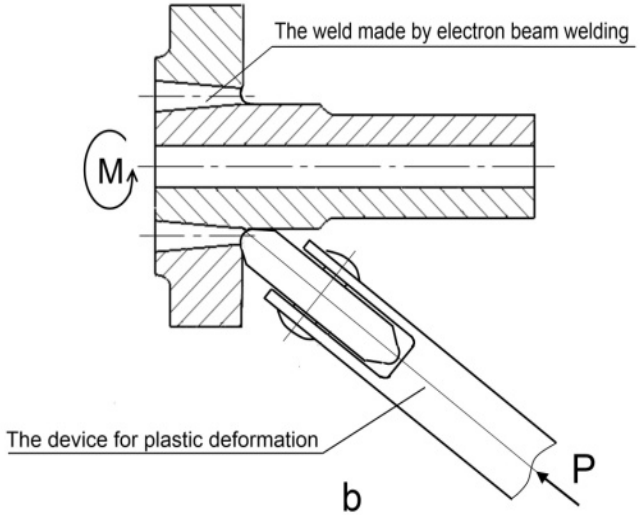
Обозначение сталей по ГОСТ 27772-88 и соответствующие марки по другим стандартам

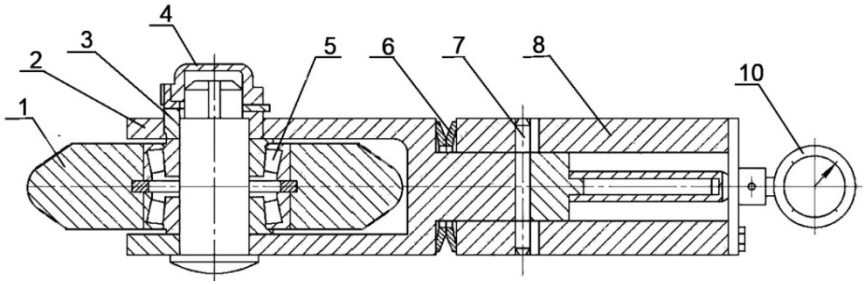
Наименование стали	Марки по действующим стандартам	
	Марка стали	Обозначение стандарта
С235	Ст3кп2	ГОСТ 380-88, ГОСТ 535-88
С245	Ст3пс5; Ст3сп5	
С255	Ст3Гпс, Ст3Гсп	ГОСТ 380-88
С275	Ст3пс	
С285	Ст3сп, Ст3Гпс, Ст3Гсп	
С345	12Г2С; 09Г2С	ГОСТ 19282-73
С345Д	12Г2СД; 09Г2СД	
С345К	10ХНДП	
С375	12Г2С	
С375Д	12Г2СД	
С390	14Г2АФ	
С390Д	14Г2АФД	
С390К	15Г2АФДпс	
С440	16Г2АФ	
С440Д	16Г2АФД	
С590	12Г2СМФ	
С590К	12ГН2МФАЮ	

Конструктивно-технологическая модернизация ступиц вариатора









Применение алюминиевых сплавов

- транспортные средства и аэрокосмический комплекс
- строительные конструкции
- пищевая промышленность

Примеры алюминиевых сплавов

Система	Марка	Состав	σ_{02} (МПа)	σ_b (МПа)	δ,%
Термически не упрочняемые					
Al	АД1Н	99,3Al	100	150	6
Al–Mn	АМц М	1,3Mn	60	120	40
	АМц Н2		130	170	25
Al–Mg	АМг3 М	3,6Mg; 0,6Si; 0,5Mn	110	220	25
	АМг6 М	6,3Mg; 0,6Mn; 0,05Si	170	340	20
	АМг6 Н		300	400	9
Термически упрочняемые					
Al–Mg–Si	АД33 Т1	1,1Mg; 0,25Cu; 0,6Si	260	310	14
Al–Zn–Mg	1915Т	1,1Mg; 1,0Si; 0,4Mn; 0,18Zn	220	350	17
	1915Т1		300	380	10
Al–Mg–Cu–Zn	В95 Т1	2,3Mg; 1,7Cu; 0,6Zn; 0,4Mn 0,18Cr	440	520	14

М – мягкий, отожженный; Н2 – полунагартованный; Н – нагартованный;
Т – закаленный и естественно состаренный;
Т1 – закаленный и искусственно состаренный.

Расчетное сопротивление алюминиевых сплавов

	Термически не упрочняемые				Термически упрочняемые				
	АД1М	АМцМ	АМг2М	АМг2Н2	АД31Т	АД31Т1	1935Т	1915	1915Т
Св. соедин	25	40	65	65	55	80	115	140	157
Осн. Ме	25	40	70	125	55	120	140	175	195
$\eta_б$	1	1	0,93	0,52	1	0,67	0,82	0,8	0,8

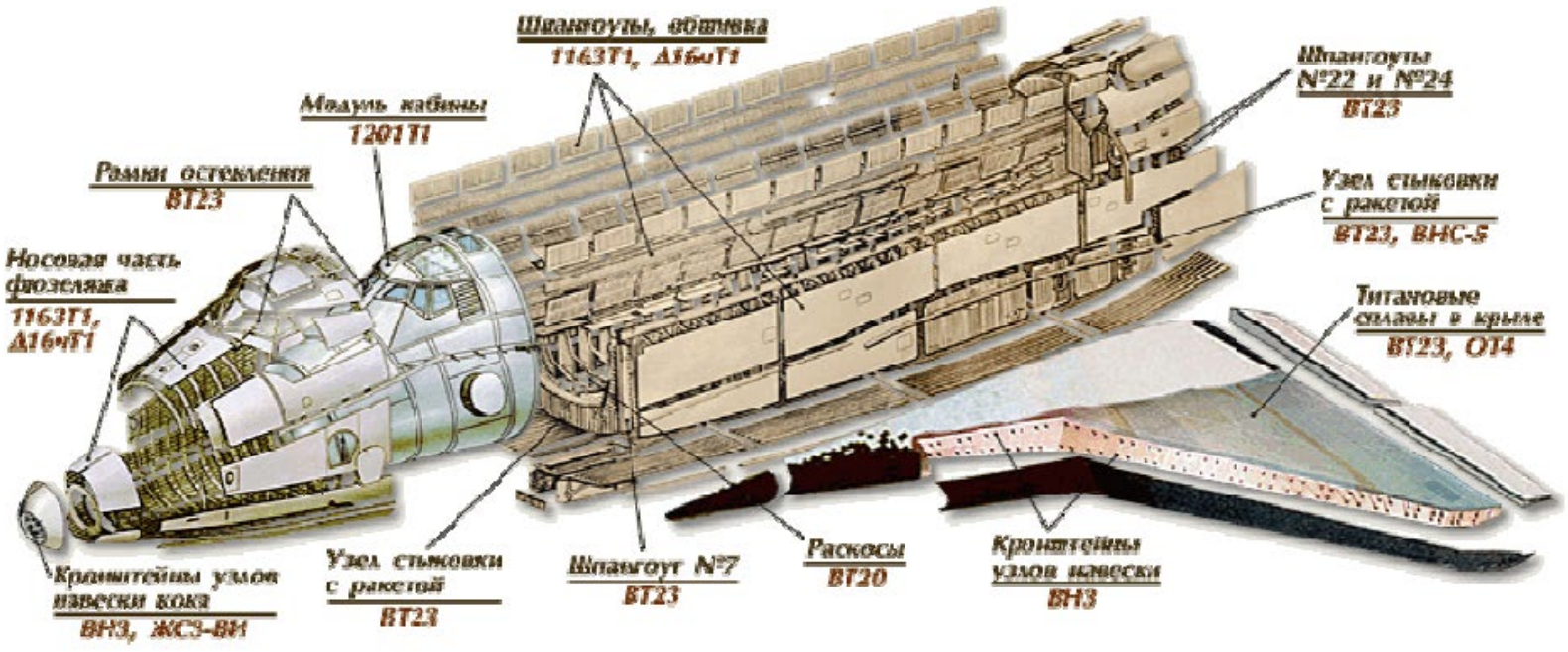
Особенности проектирования сварных конструкций из алюминиевых сплавов

- Располагать сварные соединения в наименее нагруженном участке
- Располагать швы в доступном для сварки месте
- Проектировать сварные узлы как можно более простой формы
- Обеспечивать доступность мест сварки для контроля
- Возможно утолщение стенки в районе сварного соединения
- При переменных нагрузках снижать концентрацию напряжений у шва
- Избегать несимметричное расположение сварных швов
- Избегать применение коротких и прерывистых швов

Удельная прочность конструкционных сплавов

Свойства	Сплавы			
	Алюминиевые		Титановые	Сталь
	2024-T3	7075-T6	Ti-6Al-4V	4130
$\sigma_в$, МПа	440	537	924	1380
ρ, г/см^3	2,8	2,8	4,43	7,8
$\sigma_в/\rho$, м $\cdot$ 10^3	16,1	19,6	21,3	17,9

Применение титана в космическом аппарате «Буран»



Группы титановых сплавов

1. Сплавы с **α**-структурой:
   ВТ1 (технический титан), ВТ5, ВТ5-1, ВТ10
2. Сплавы с **α+β** структурой:
   ОТ4, ОТ4-1, ВТ4, ВТ9, ВТ8, ВТ6
3. Сплавы с **β** структурой:
   ВТ14, ВТ15

Марка	Состав	σ_b, (МПа)	δ, %	ψ, %
ВТ1-0	Нелегированный	390…540	≥20	≥50
ВТ5-1	5Al-2,5Sn	750…900	6…26	12…45
ВТ6	Ti-6Al-4,5V	880…1230	6…20	12…50
ВТ22	Ti-5Al-5Mo-5V-1Cr-1Fe	960…1860	3,5…18	12…65

Виды исходных заготовок

- Литьё
- Кованые заготовки
- Прокат листовой
- Сортовой прокат

Листовая сталь

- по способу производства:
  - горячекатаную
  - холоднокатаную
- по толщине:
  - тонколистовая (δ = 0,5 - 3,9 мм)
  - толстолистовая (δ = 4 - 160 мм)
- по видам поставки:
  - в виде листа (δ = 4 - 160 мм)
  - в рулонах (δ = 4 - 12 мм)

Градация по

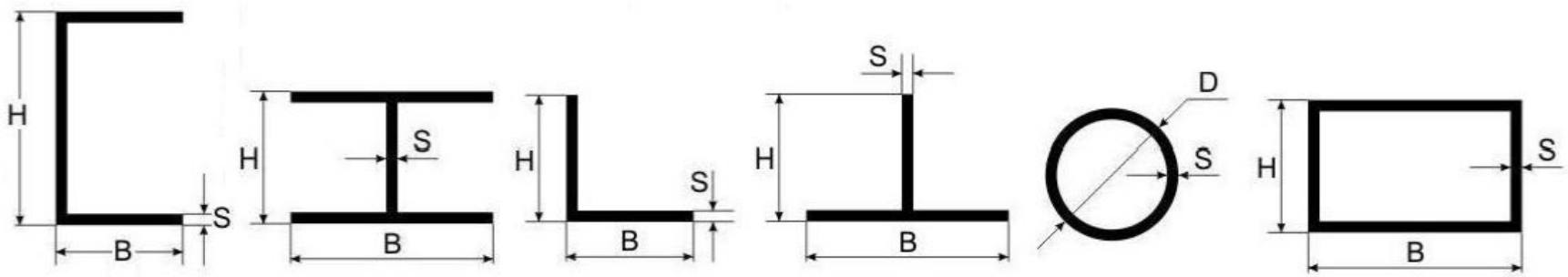
ГОСТ 19903-74 «Прокат листовой горячекатаный»

- по точности прокатки:
  - А - повышенной точности;
  - Б - нормальной точности.
- по плоскостности:
  - ПО - особо высокой плоскостности;
  - ПВ - высокой плоскостности;
  - ПУ - улучшенной плоскостности;
  - ПН - нормальной плоскостности.
- по характеру обработки кромки:
  - НО - с не обрезной кромкой;
  - О - с обрезной кромкой.
- по размерам

$$\text{Лист}\ \frac{\text{А – ПО - О 8х1500х6000 ГОСТ 19903-74}}{\text{Ст3сп3 - св ГОСТ14637-89}}$$

Сортовой прокат

- с простым профилем сечения
- фасонный



ГОСТ 8240-97 «Швеллеры стальные горячекатаные. Сортамент»

У - с уклоном внутренних граней полок

П - с параллельными гранями полок

Э - экономичные с параллельными гранями полок

Л - легкой серии с параллельными гранями полок

С - специальные

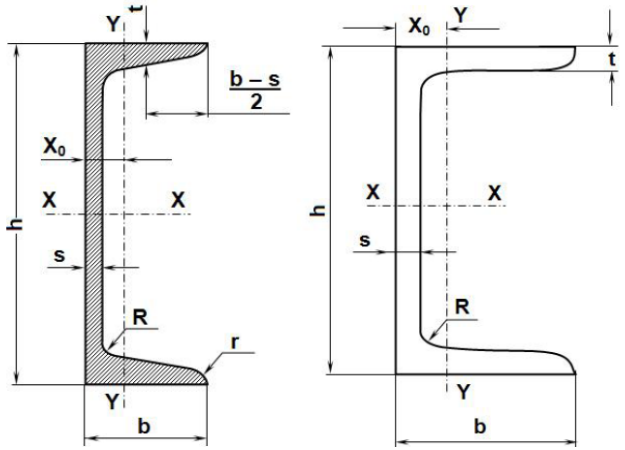
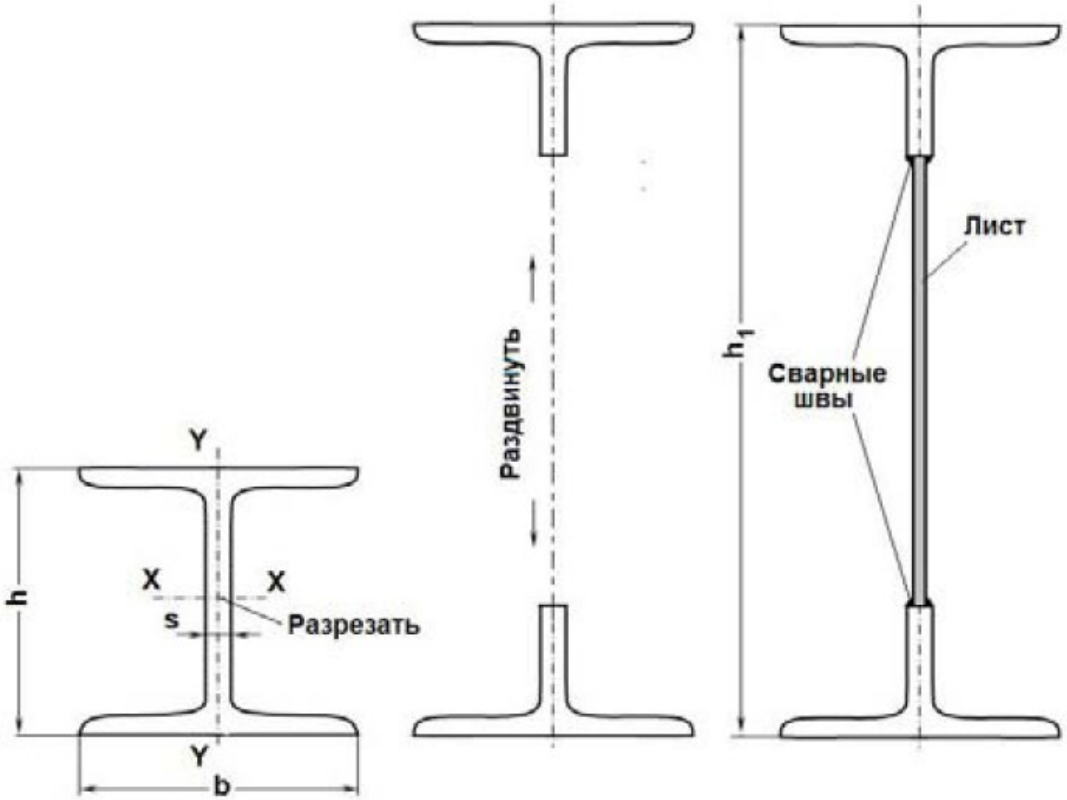


Таблица 1.1

Швеллеры с уклоном внутренних граней полок

Номер швеллера серии У	h	b	s	t	R	r	Площадь поперечного сечения *F*, см^2	Масса 1 м, кг	Справочные значения для осей							X_0, см
					не более				X-X				Y-Y			
	мм								I_x, см^4	W_x, см^3	i_x, см	S_x, см^3	I_y, см^4	W_y, см^3	i_0, см	
5У	50	32	4,4	7,0	6,0	2,5	6,16	4,84	22,8	9,1	1,92	5,59	5,61	2,75	0,95	1,16
6,5У	65	36	4,4	7,2	6,0	2,5	7,51	5,90	48,6	15,0	2,54	9,00	8,70	3,68	1,08	1,24
8У	80	40	4,5	7,4	6,5	2,5	8,98	7,05	89,4	22,4	3,16	23,30	12,80	4,75	1,19	1,31
10У	100	46	4,5	7,6	7,0	3,0	10,90	8,59	174,0	34,8	3,99	20,40	20,40	6,46	1,37	1,44
12У	120	52	4,8	7,8	7,5	3,0	13,30	10,40	304,0	50,6	4,78	29,60	31,20	8,52	1,53	1,54
14У	140	58	4,9	8,1	8,0	3,0	15,60	12,30	491,0	70,2	5,60	40,80	45,40	11,00	1,70	1,67
16У	160	64	5,0	8,4	8,5	3,5	18,10	14,20	747,0	93,4	6,42	54,10	63,30	13,80	1,87	1,80

Последовательность изготовления двутавровых балок

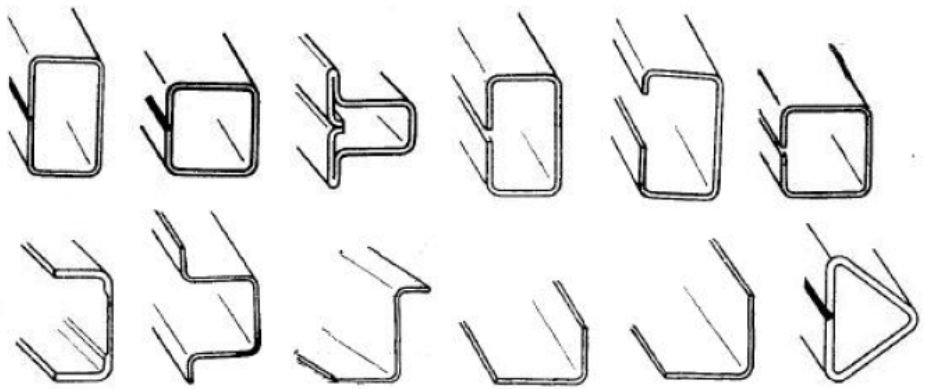


Применение гнутых замкнутых сварных профилей

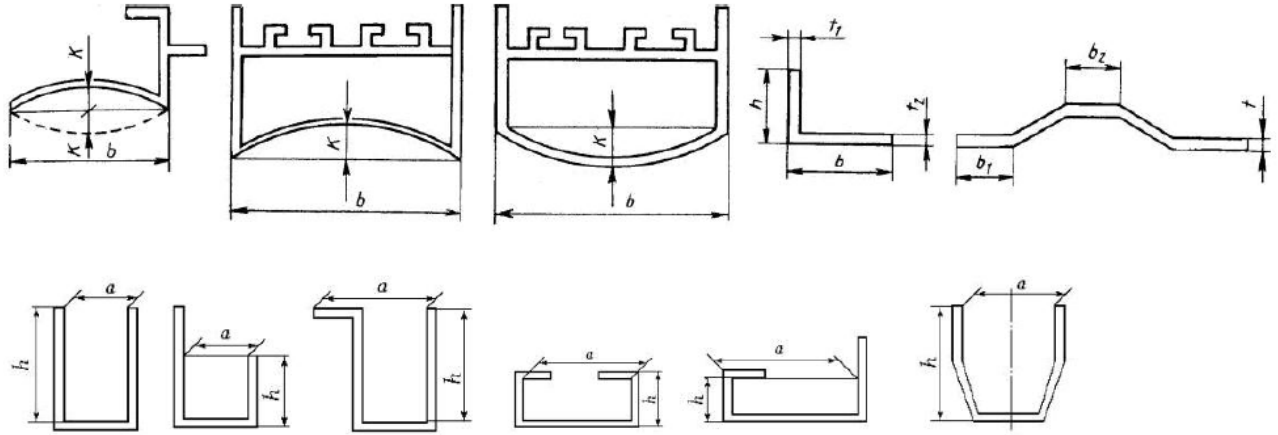
- Большее сопротивление потери устойчивости
- Меньший вес
- Не требуется окраска внутренней полости
- Восприятие в меньшей степени ветровой нагрузки
- Большая жесткость при кручении и изгибе

Алюминиевые профили

- Гнутые



- Прессованные

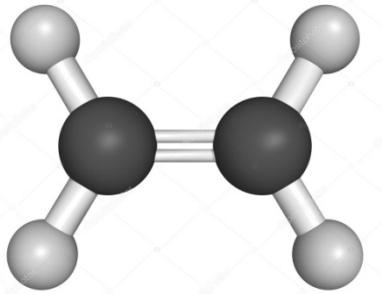


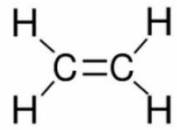
Полимерное сырье

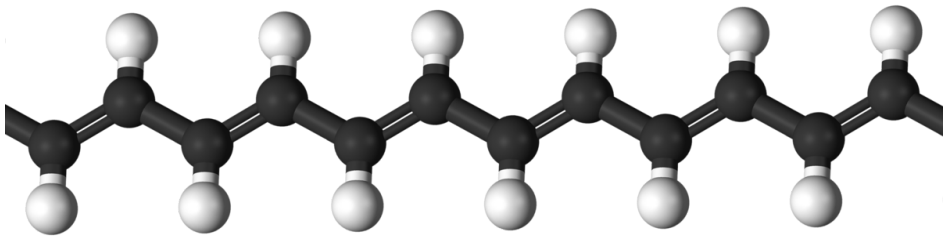
Экономический эффект от использования полимерных труб

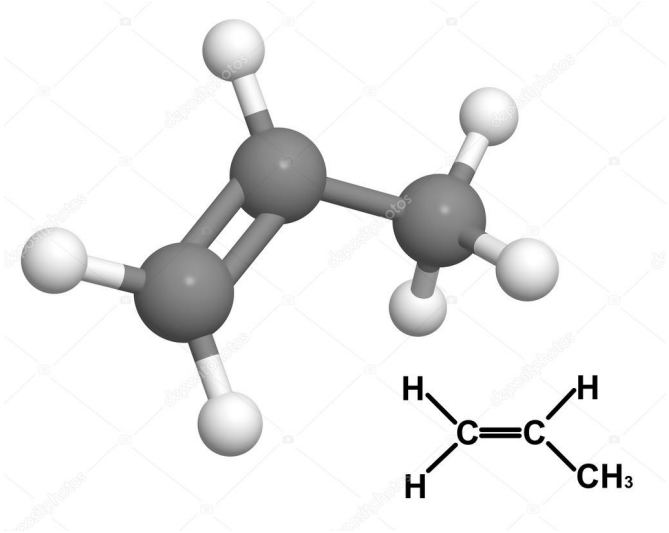
- Затраты на транспортировку (1:9)
- Сокращения трудоемкости
- Снижение отходов при монтаже (1:10)
- Экономия расходных материалов
- Отсутствие расходов в период эксплуатации
- Значительный срока службы (более 50 лет)

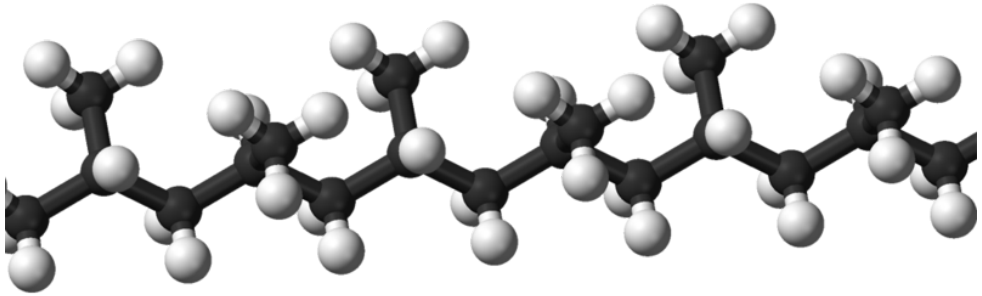
Полиолефины











Показатель текучести расплава (ПТР)

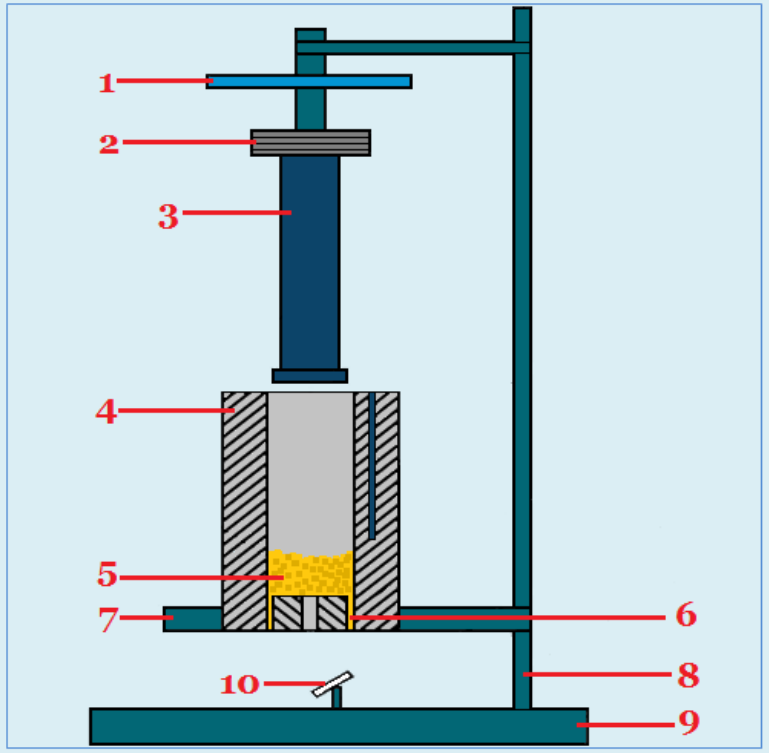


Рисунок 1: Схема вискозиметра для определения ПТР:
1- штурвал; 2- грузы; 3-поршень; 4- циллиндр;
5- полимер; 6- капилляр; 7- подставка; 8- стойка;
9-основание; 10- зеркало;

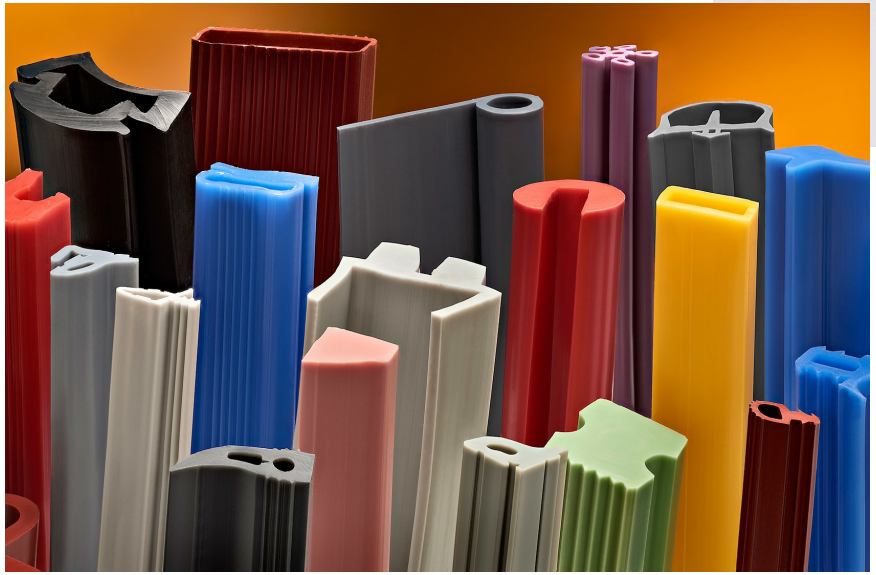
TERLURAN GP-35 NAT

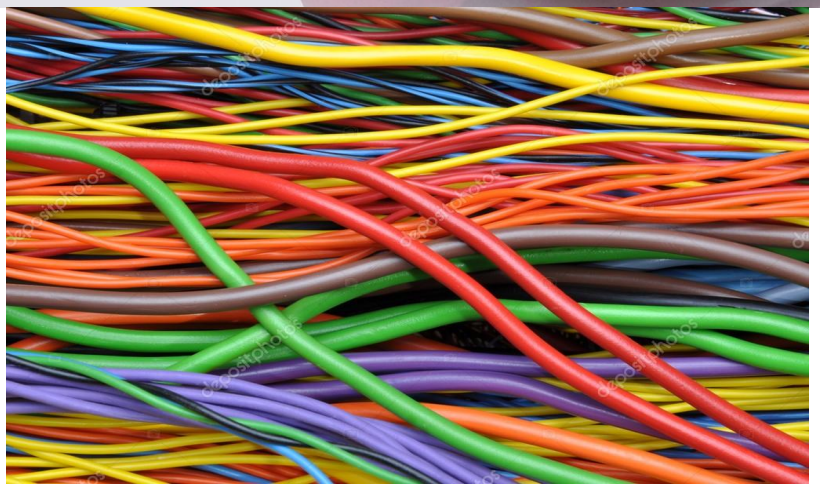
ПТР	при 200°С/5кг	3.1 г/10 мин
ПТР	при 230°С/3,8кг	10.0 г/10 мин.
ПТР	при 220°С/10кг	35.0 г/10 мин.

Изделия из полиолефинов

Изделия из ПЭТ

Изделия из ТЭП





Литье под давлением

Недостатки полимерных материалов

- Высокие нагрузки и температуры приводят к снижению сроков эксплуатации
- Изменение механических характеристик под действием ультрафиолетового излучения
- Относительно узкий диапазон температур эксплуатации

Применение керамики

Высокоамперный ввод.
Паяное соединение Металл - керамика

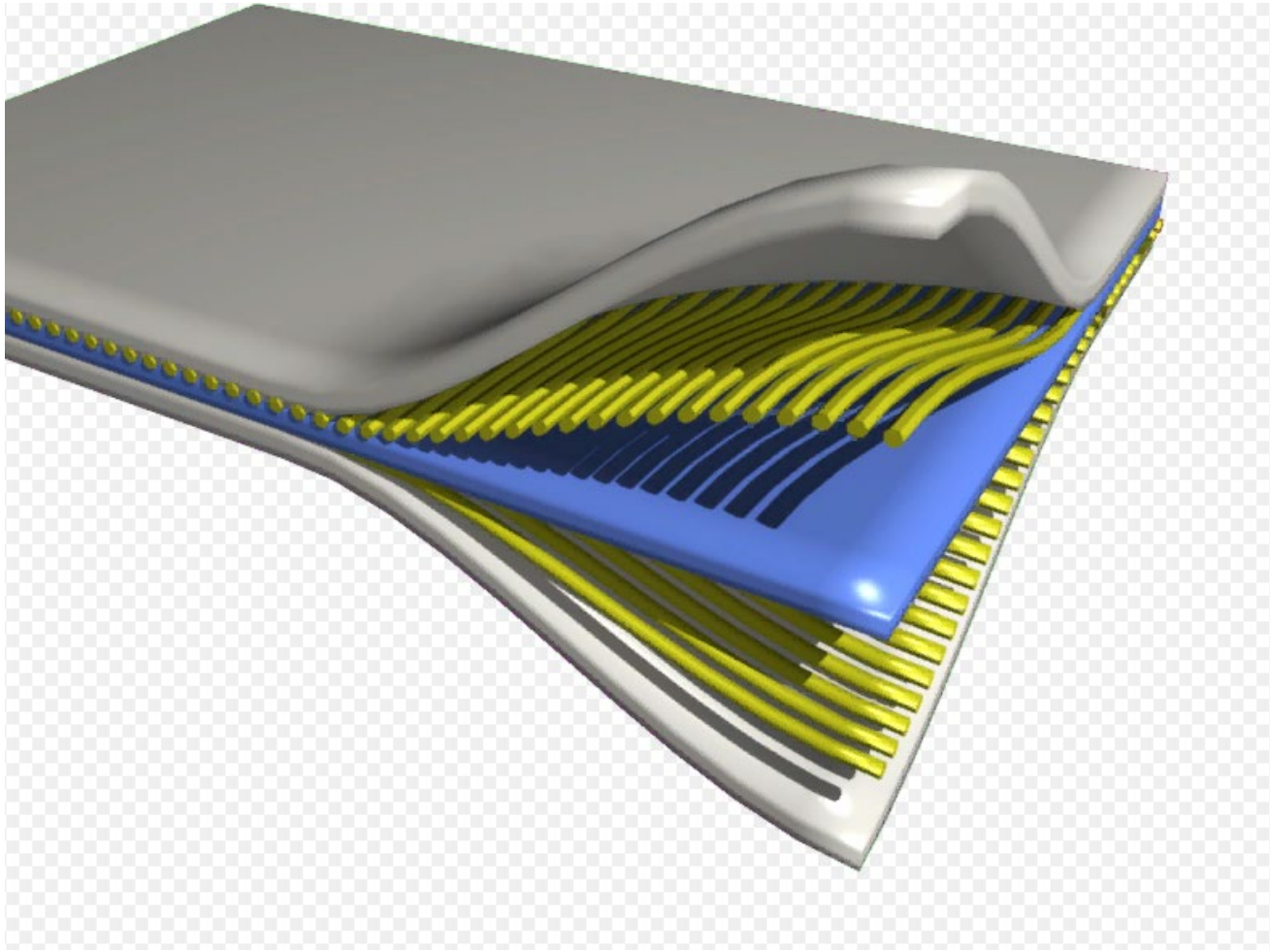
Керамический (Si_3N) ротор
турбокомпрессора

Клапан, облицованный керамикой через
компенсирующую прослойку с помощью пайки

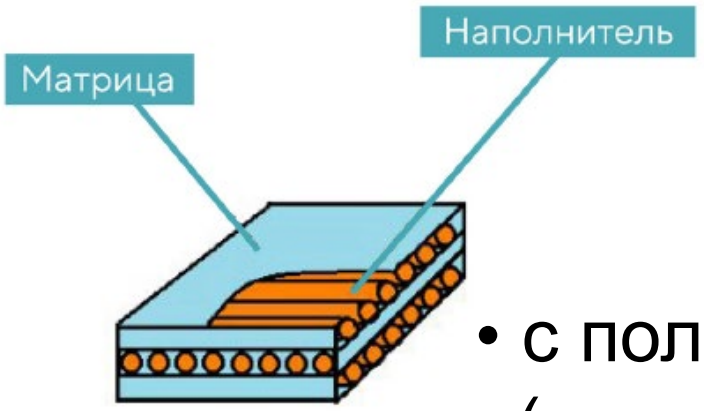
Свойства керамики

- низкая тепло- и электропроводность
- высокая химическая стойкость
- высокая твердость
- низкий коэффициент трения
- высокая износостойкость
- низкий коэффициент температурного расширения
- низкая плотность
- высокая прочность при сжатии

Композиты



Классификация композитов



- с полимерной матрицей (полимерные КМ);
- с металлической матрицей (металлические КМ);
- с керамической матрицей (керамические КМ);
- дисперсионно упрочненные сплавы.

Назначение КМ

- общеконструкционного назначения;
- жаропрочные;
- термостойкие;
- фрикционные и антифрикционные;
- ударопрочные;
- со специальными свойствами

  (теплозащитные электрическими, магнитными, ядерными и др.).

Примеры использования композитных материалов

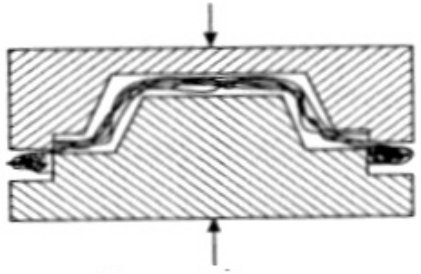
Мост из армированного стеклопластика (Дания)

Глубоководный аппарат из армированного стекловолокна

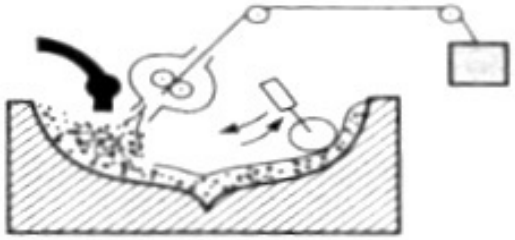
Номенклатура типовых композитных агрегатов РКН «Протон-М»

Наполнители
Неорганические
Органические
Дисперсные
Волокнистые
Тканые
Нетканые
Тонкодисперсные до 5 мкм
Среднедисперсные до 50 мкм
Крупнодисперсные до 500 мкм
Зернистые свыше 500 мкм
Коротковолокнистые до 20 мкм
Длинноволокнистые до 20 мкм
Волокнистые неориентированные (войлок)
Волокнистые ориентированные (ленты)
Сатиновые рулонные
Ковровые холсты
Штапельные шнуры
Однонаправленные ленты
Бумаги
Картоны
Сетки
Маты

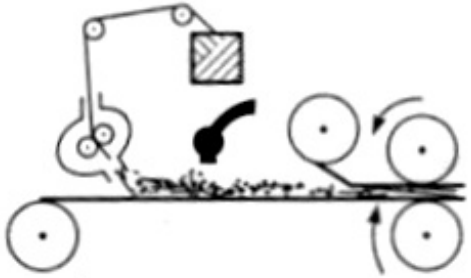
Технологии производства композитов



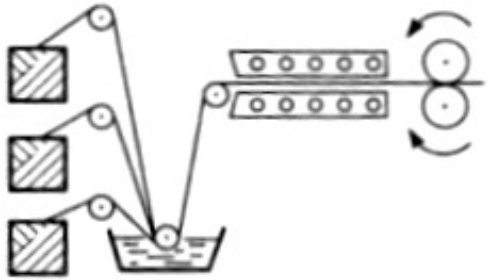
Прессование в замкнутой форме



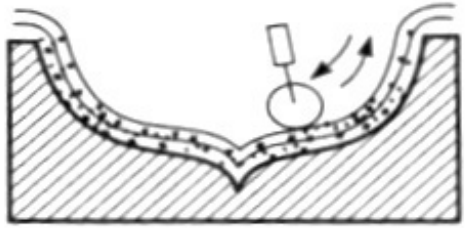
Напыление



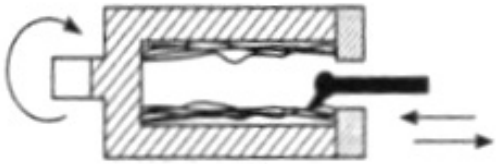
Формование листов



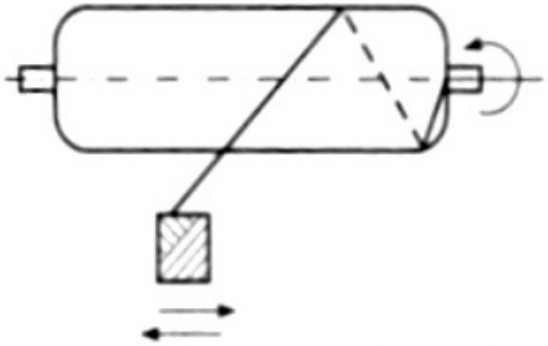
Протяжка (пултрузия)



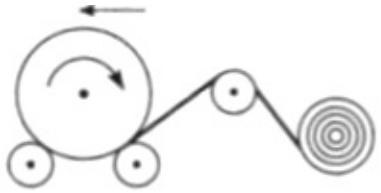
Контактное формование



Центробежное формирование труб



Намотка непрерывного однонаправленного наполнителя (нити, жгута, ленты)



Намотка непрерывного рулонного наполнителя (ткани, холста)

Основные преимущества КМ:

- высокая прочность;
- высокая жесткость;
- высокая усталостная прочность;
- малый удельный вес;
- сопротивление «старению материала»;
- малая подверженность износу.

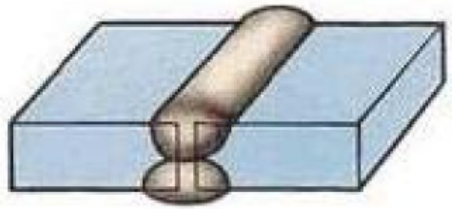
Основные недостатки КМ:

- анизотропия;
- гигроскопичность,
- токсичность
- повышенная наукоемкость производства;
- высокая цена

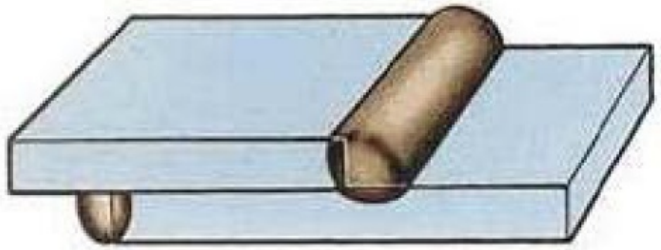
Типы сварных соединений и условия их работы

Сварные швы и соединения, выполняемые сваркой плавлением (ГОСТ 2601-84)

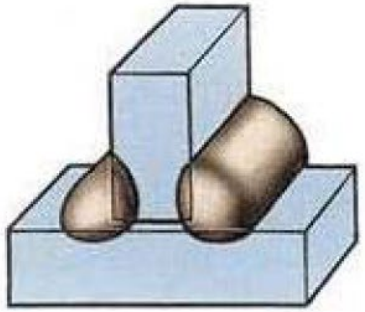
Сварные соединения



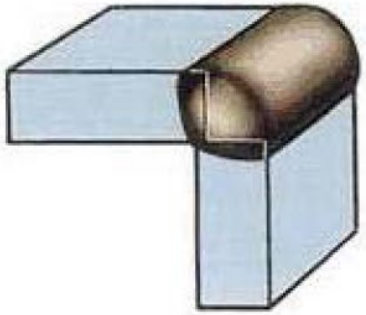
Стыковое



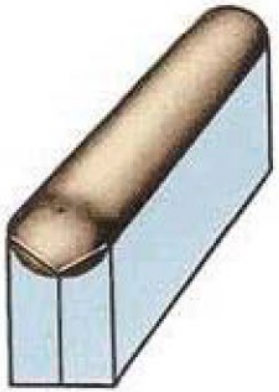
Нахлесточное



Тавровое



Угловое

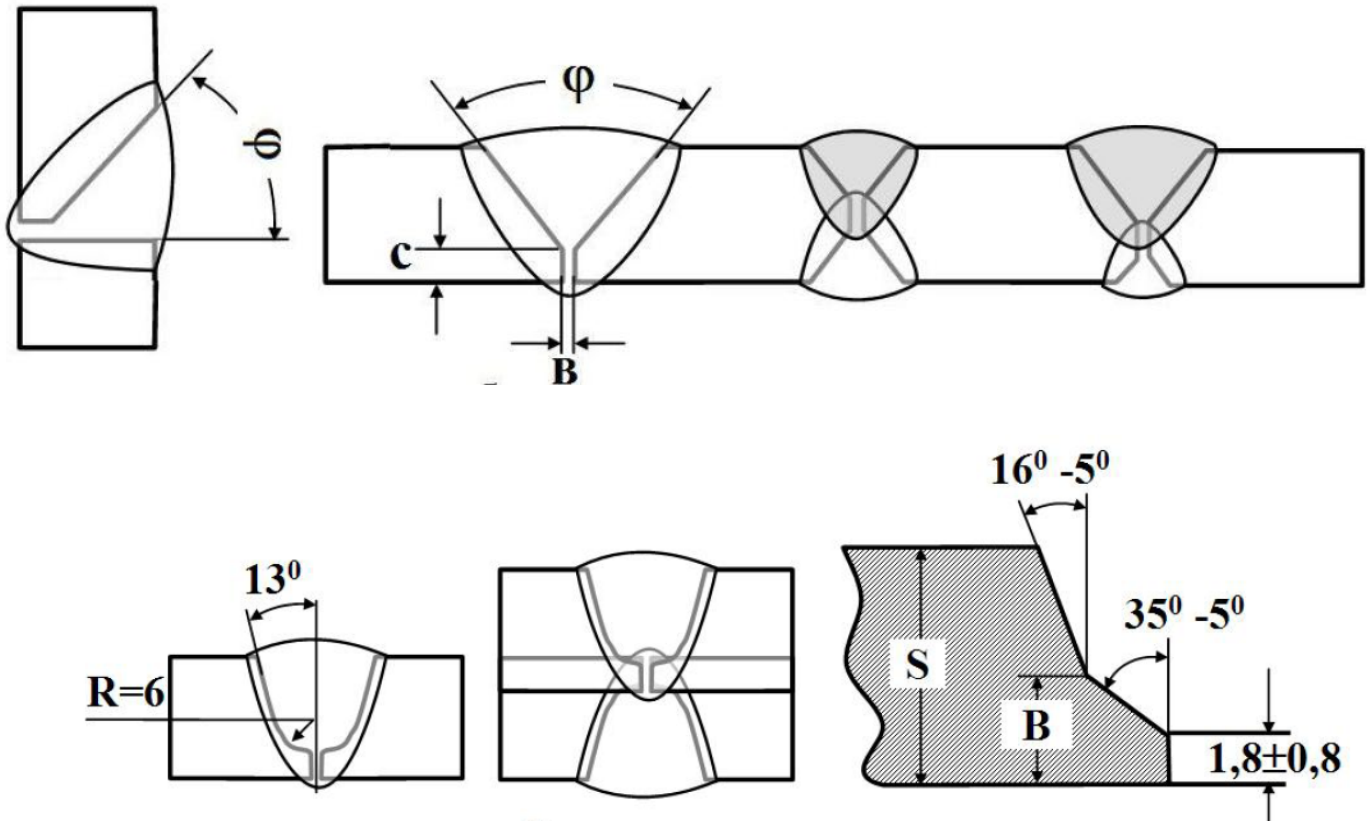


Торцевое

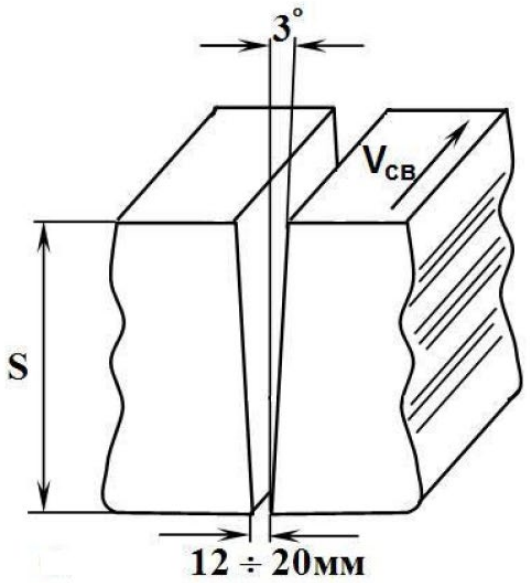
Сварные швы

- **Стыковые**
- **Угловые**
- *Прорезные*
- *Проплавные*

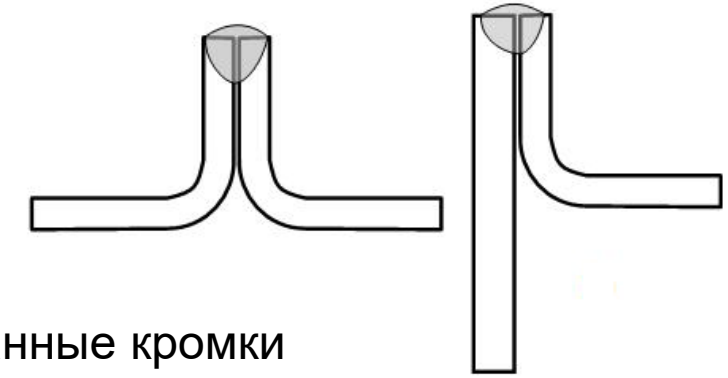
Способы разделки кромок



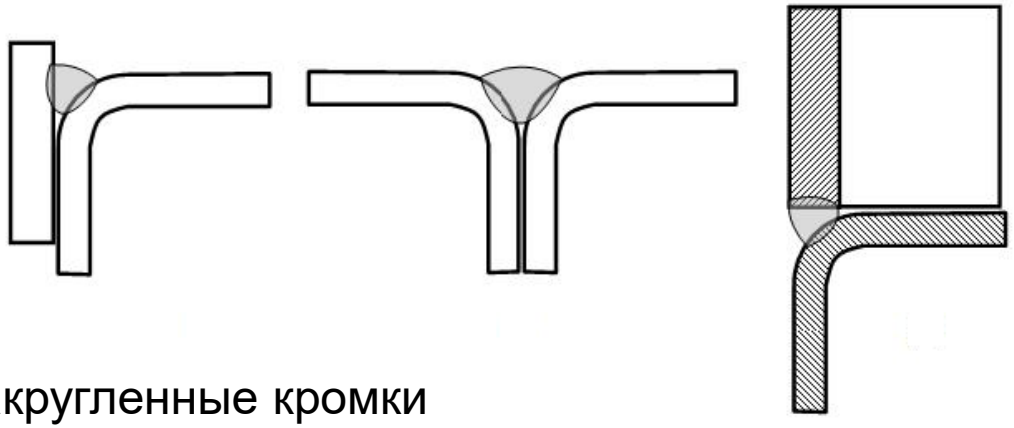
Щелевая разделка кромок



Сварные соединения тонких листов

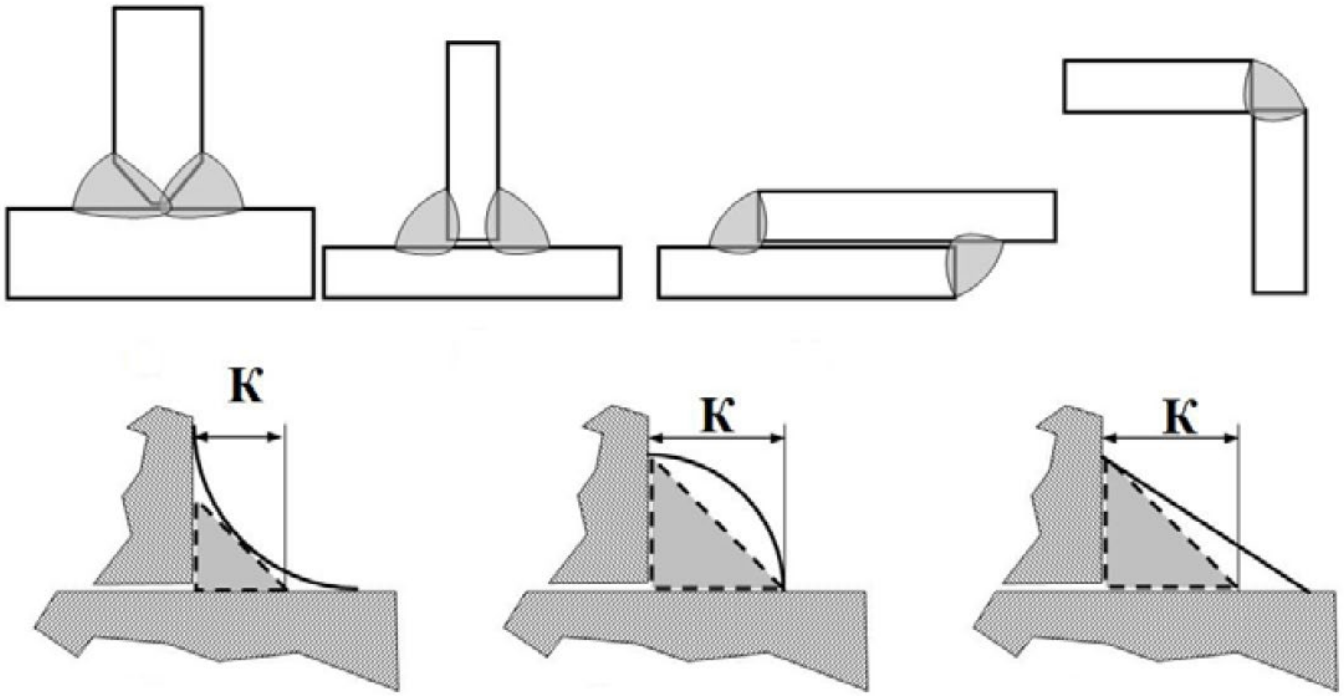


Отбортованные кромки

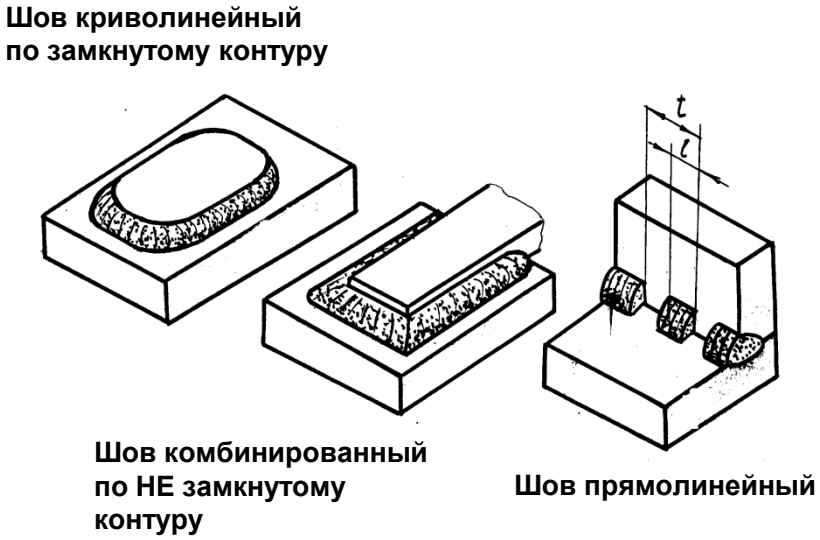


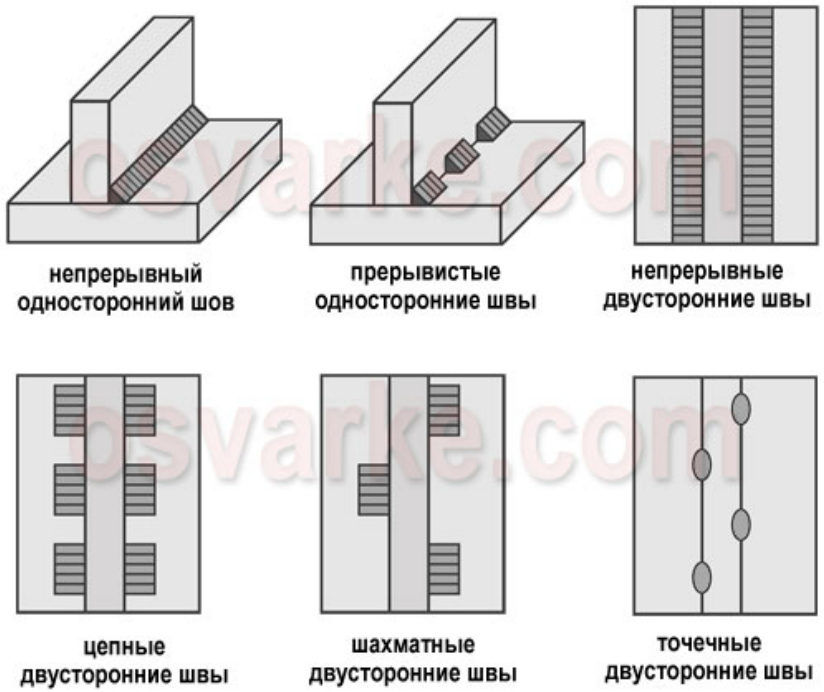
Закругленные кромки

Соединения с угловыми швами

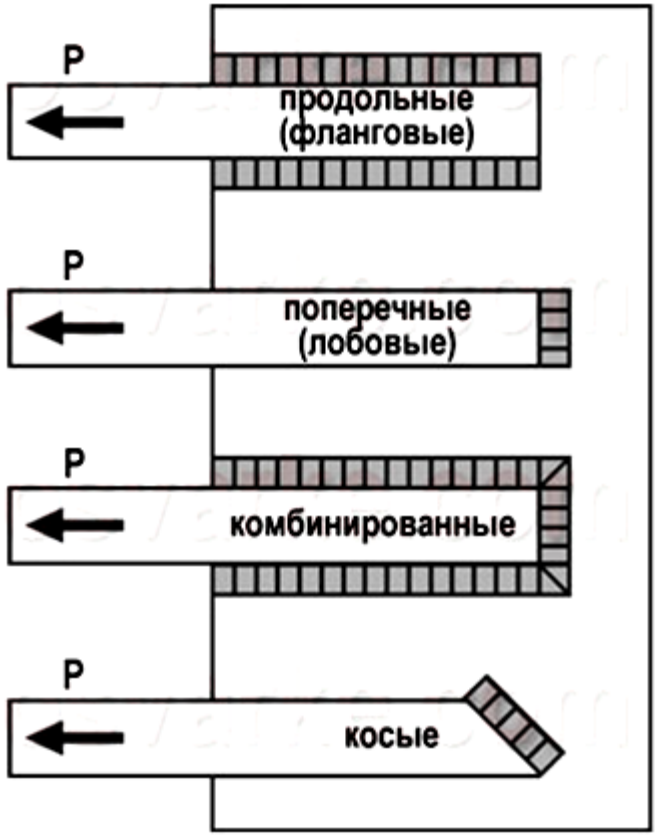


Конфигурация сварных швов



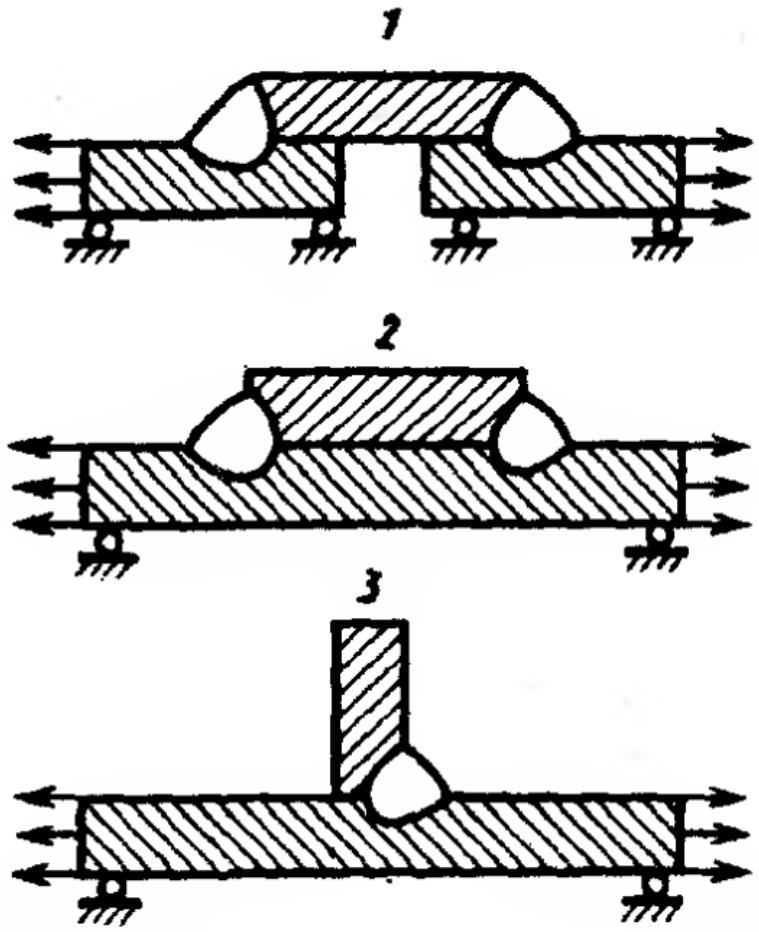


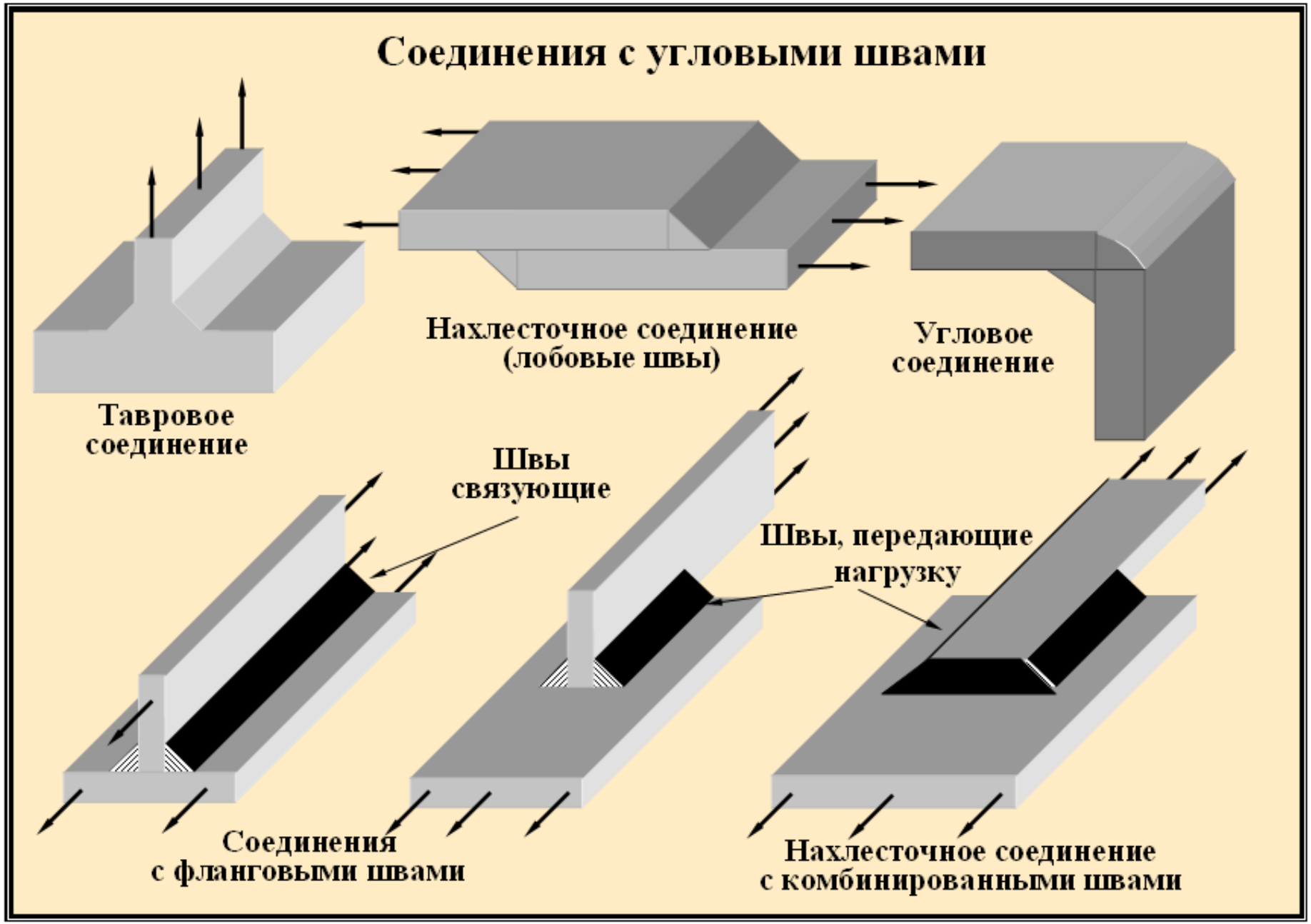
Ориентация сварных швов относительно силового потока



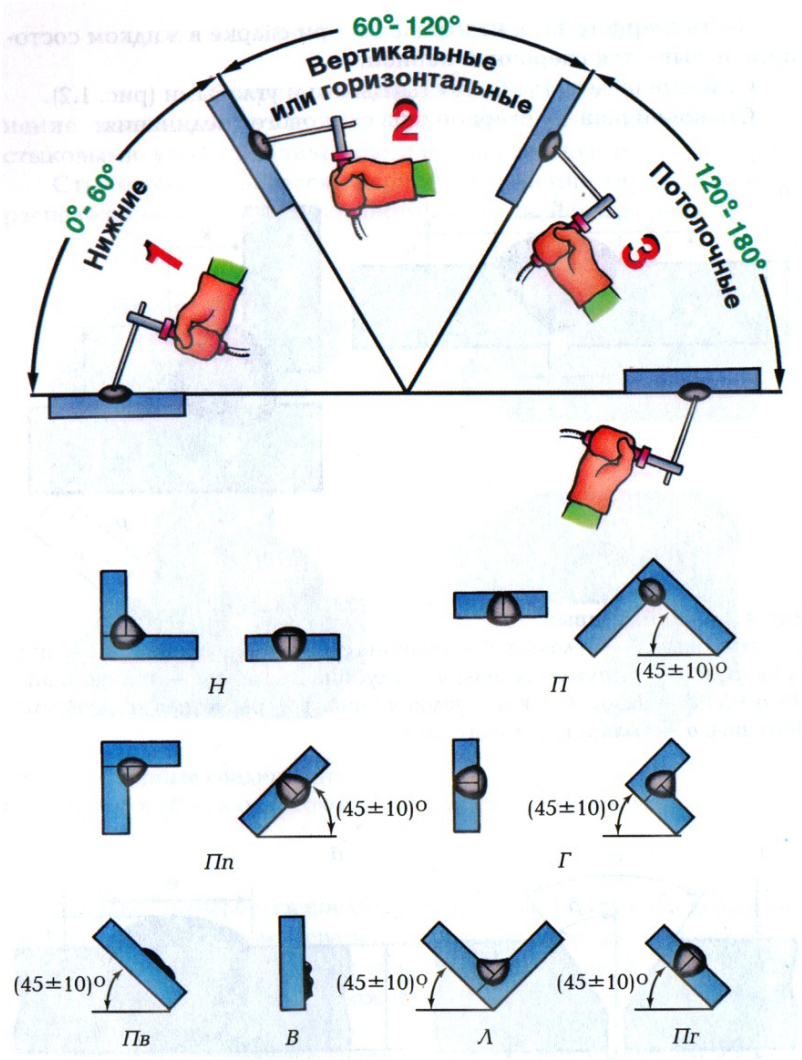
P – действующее усилие

Сварные швы при передаче усилий




Соединения с угловыми швами
Тавровое соединение
Нахлесточное соединение (лобовые швы)
Угловое соединение
Швы связующие
Швы, передающие нагрузку
Соединения с фланговыми швами
Нахлесточное соединение с комбинированными швами

Сварные швы в различных пространственных положениях (ГОСТ 11969-79)



Н - нижние;

П - потолочные;

Пп - полупотолочные;

Г - горизонтальные;

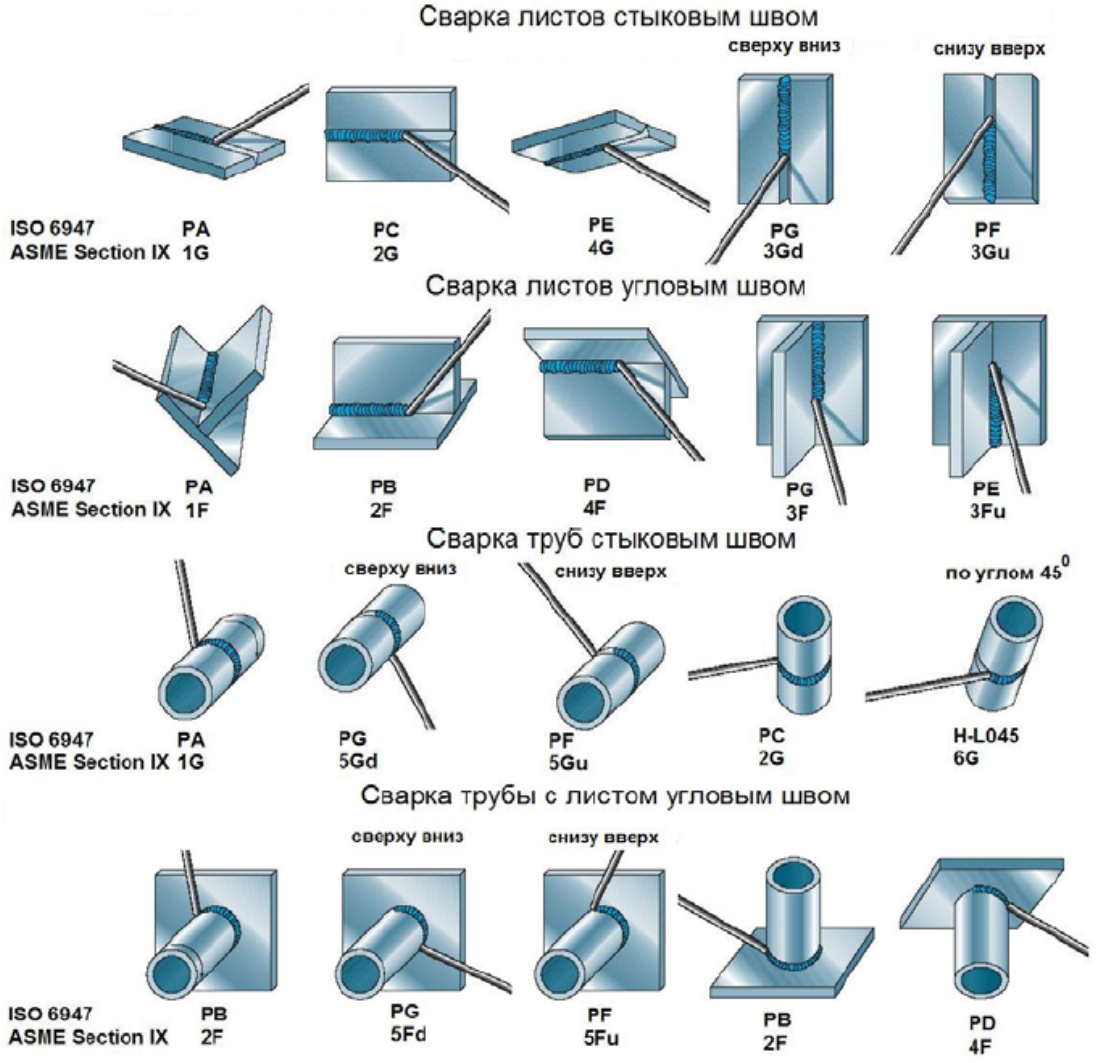
Пв -полувертикальные;

В - вертикальные;

Л - в лодочку;

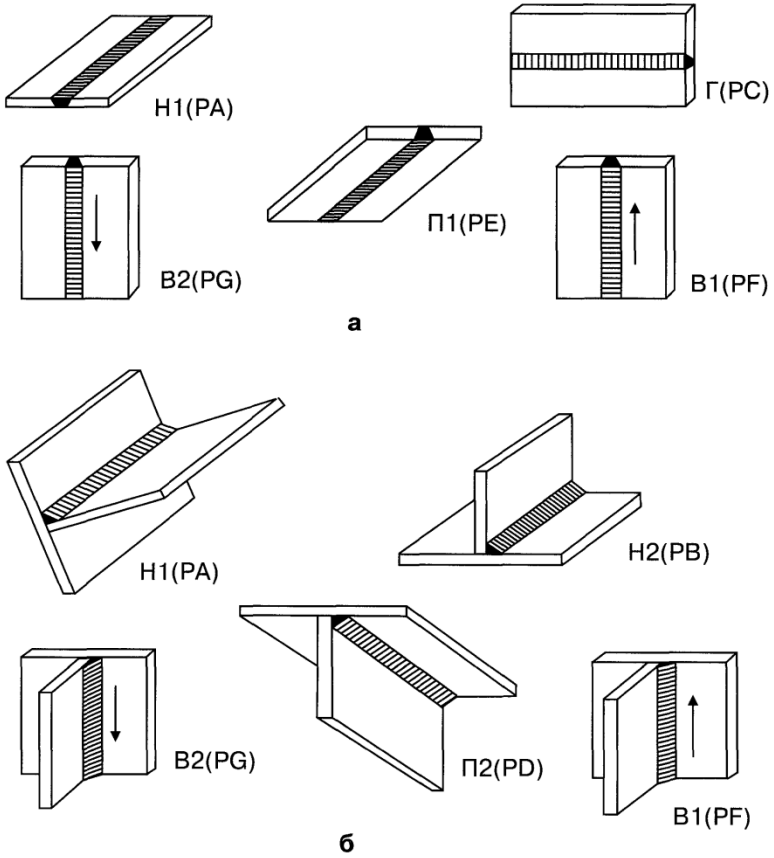
Пг – полугоризонтальные

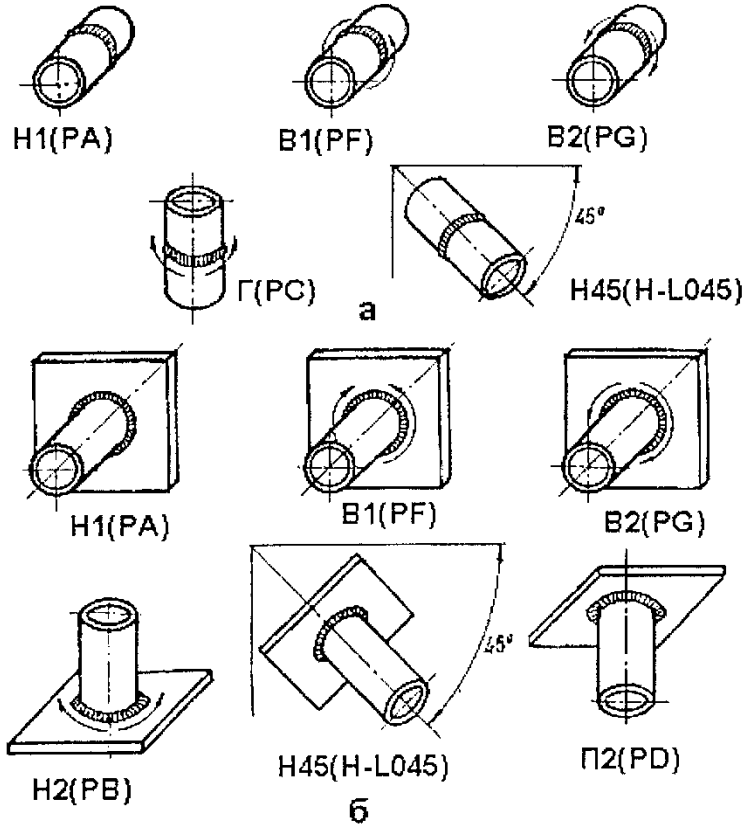
Обозначения положение швов при сварке ISO 6947 или ASME Section IX



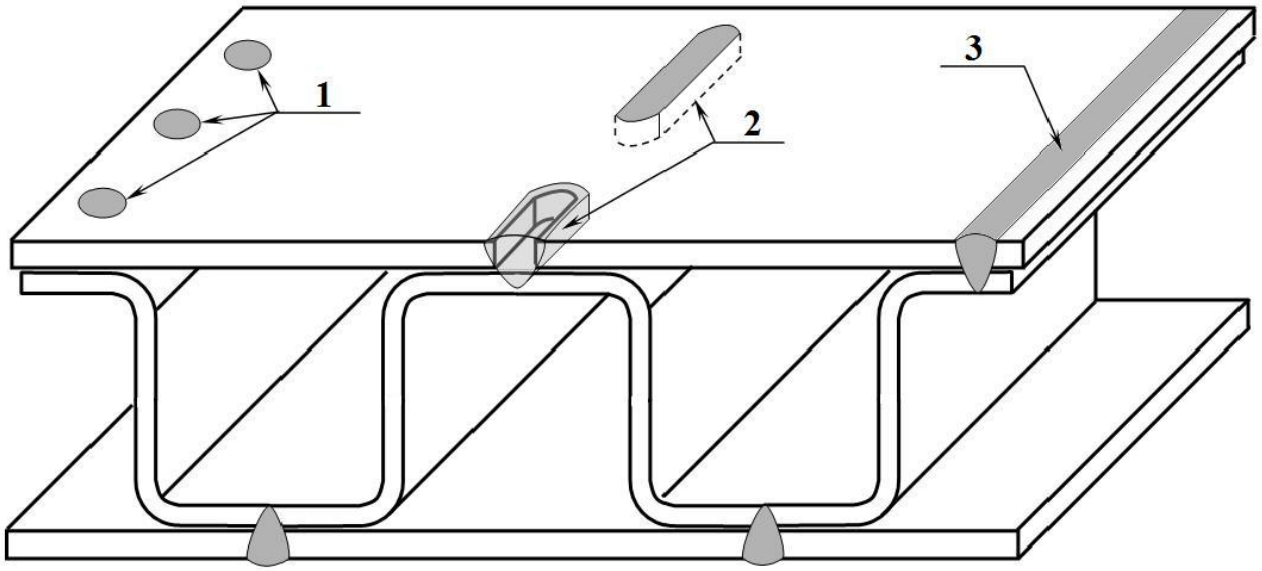
Классификация положений при сварке

РД 03-495-02 Технологический регламент проведения аттестации сварщиков и специалистов сварочного производства



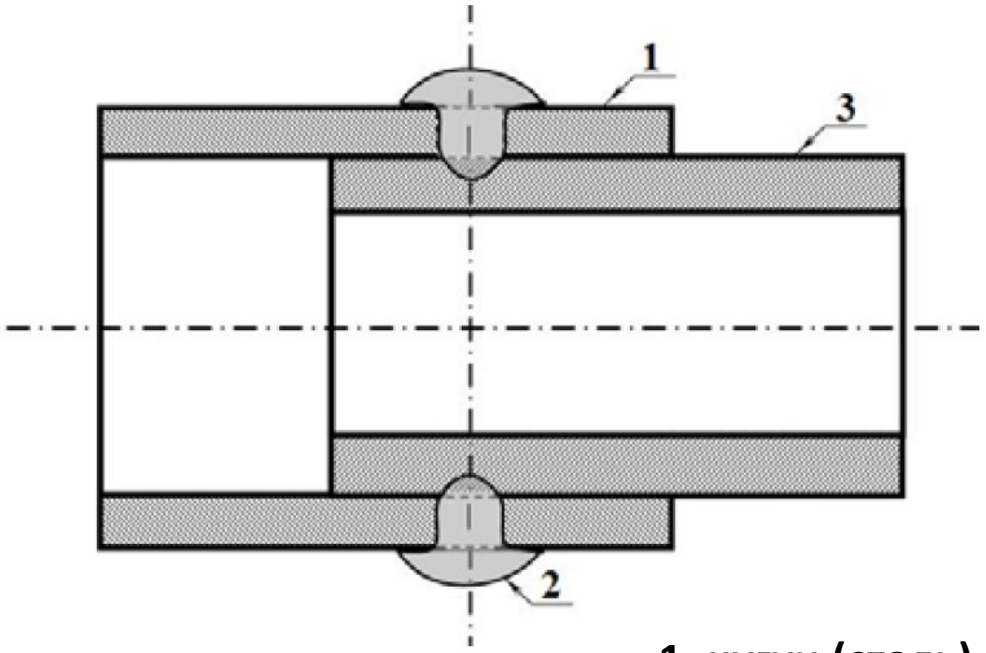


Нахлесточные соединение с полным проплавлением верхнего элемента



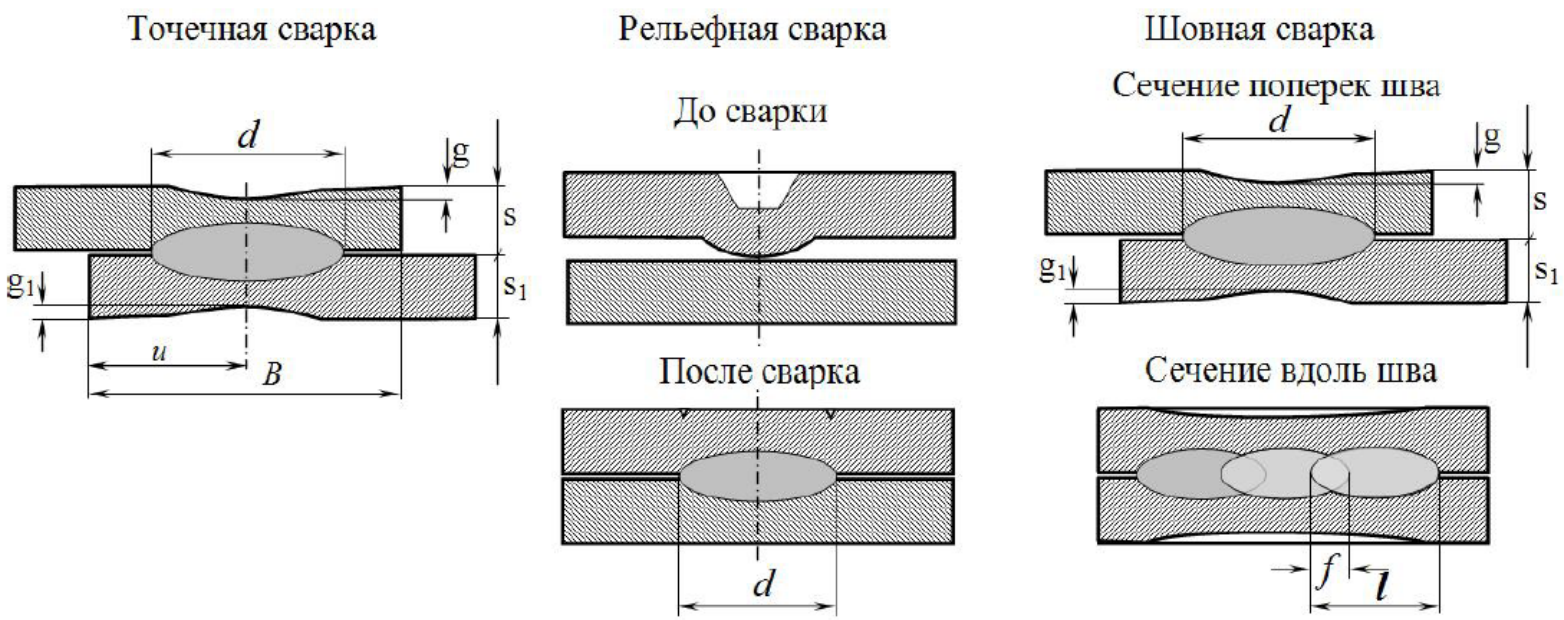
1 - дуговой точечный шов;
2 - прорезной шов;
3 - проплавной шов.

Дуговые точечные швы, выполненные через отверстие



1- чугун (сталь);
2 - металл дугового точечного шва;
3 - сталь (алюминий).

Сварные швы выполняемые контактной сваркой



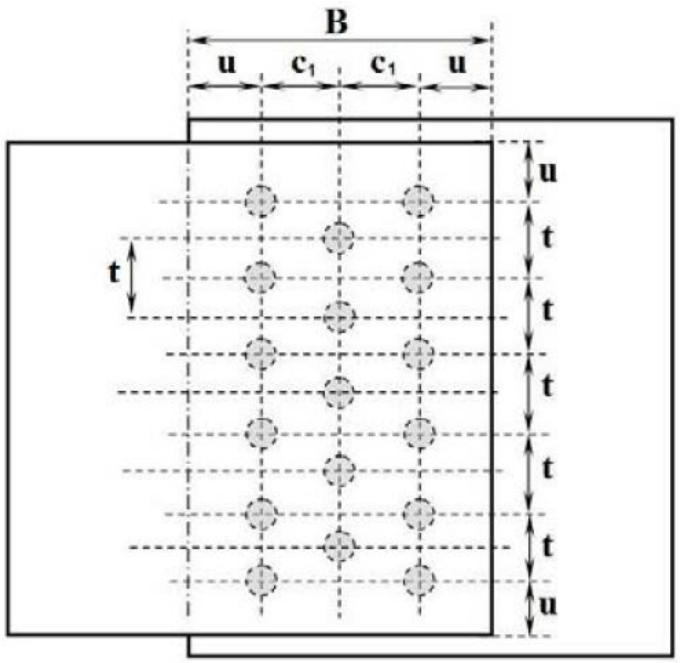
d - расчетный диаметр (ширина) рабочего сечения точки (шва);

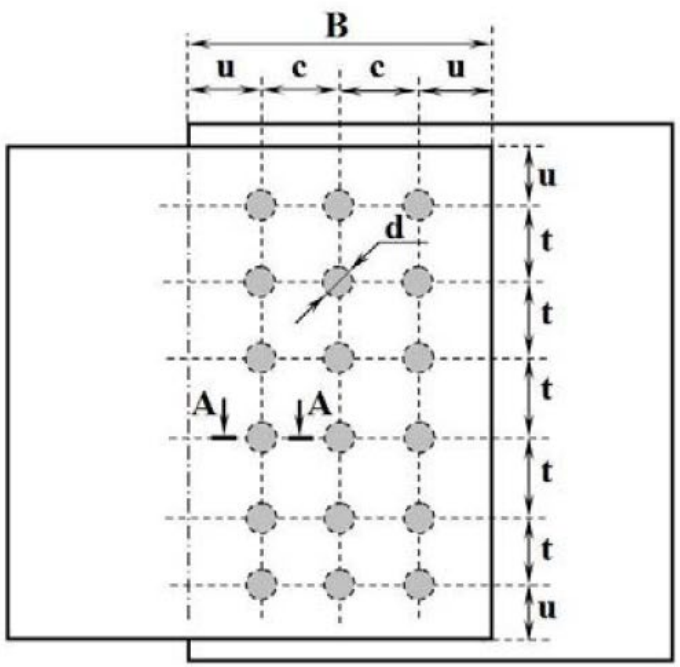
B - ширина нахлестки;

l - длина литой зоны шва;

f - величина перекрытия литых зон шва.

Расположение сварных точечных швов ГОСТ 15878-79





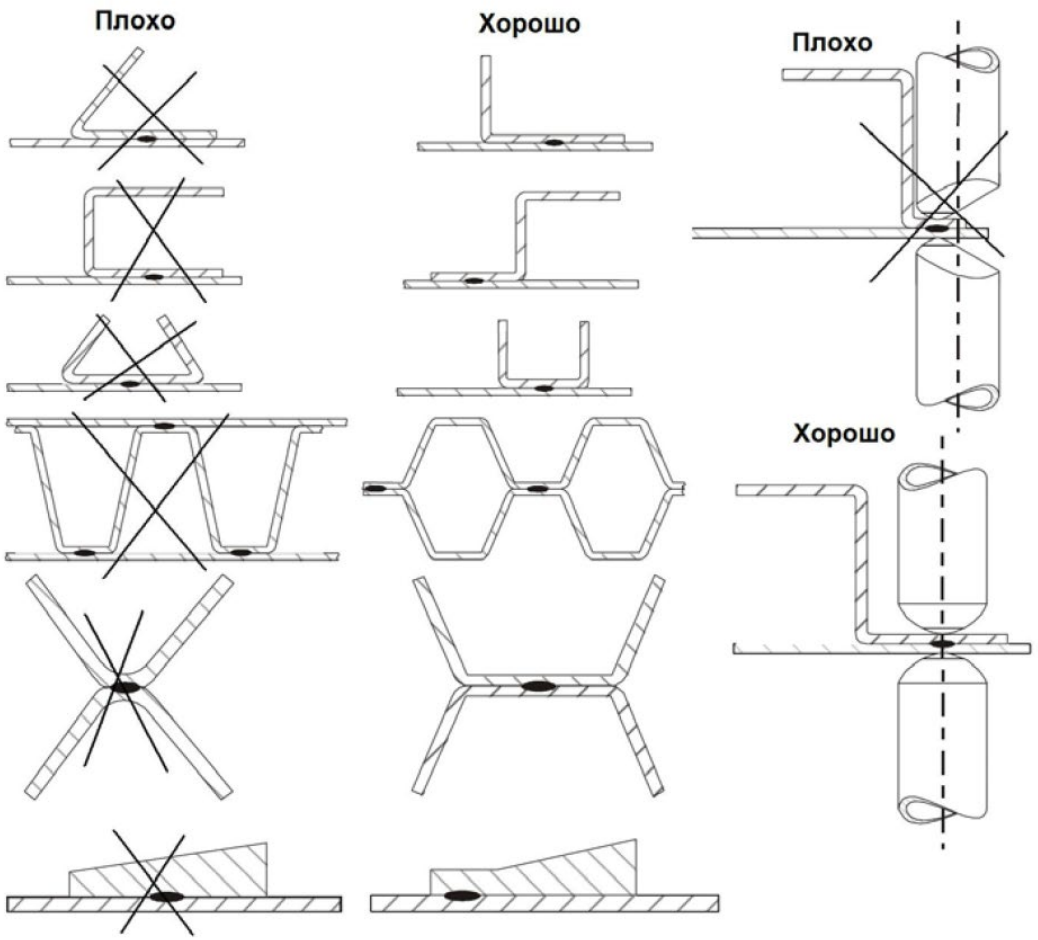
$B = 2u + c_1 (n-1)$

$B = 2u + c (n-1)$

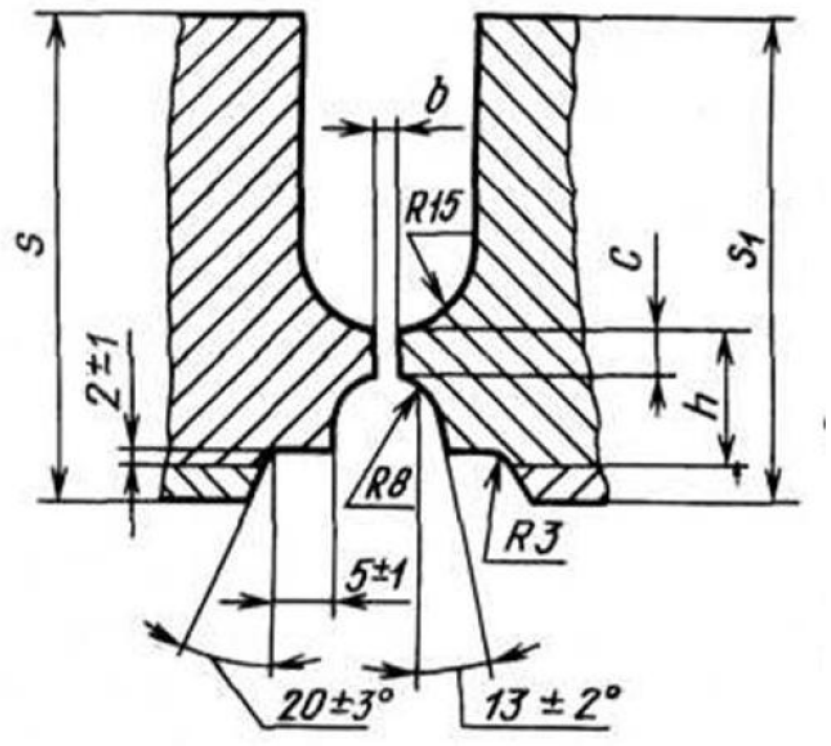
$c_1 \geq 0{,}8c$

$u \geq 0{,}5B$

Обеспечение технологичности контактной сварки на стадии проектирования



Подготовка кромок для сварки в стык двухслойной стали (ГОСТ 16098-80)



- Р - ручная дуговая сварка металлическим покрытым электродом
- АФф - автоматическая дуговая сварка под флюсом на флюсовой подушке;
- АФ - автоматическая дуговая сварка под флюсом без применения подкладок;
- З - дуговая сварка в защитных газах;
- Ш - электрошлаковая сварка.

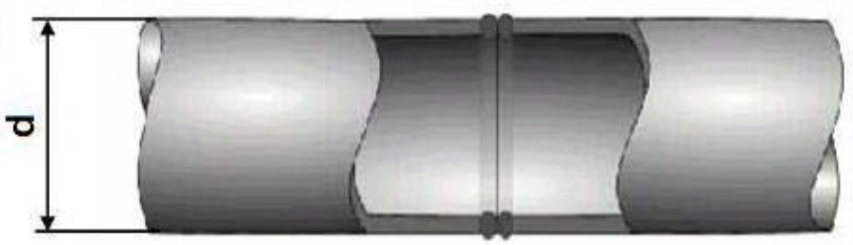
Способы соединения полимерных материалов

- склеивание
- сварка трением
- сварка лазерным лучом
- ультразвуковая сварка
- экструзионная сварка
- сварка горячим воздухом
- сварка нагретым инструментом
- сварка нагревательным элементом встроенным в одну из свариваемых деталей

Типы сварных соединений полимерных труб

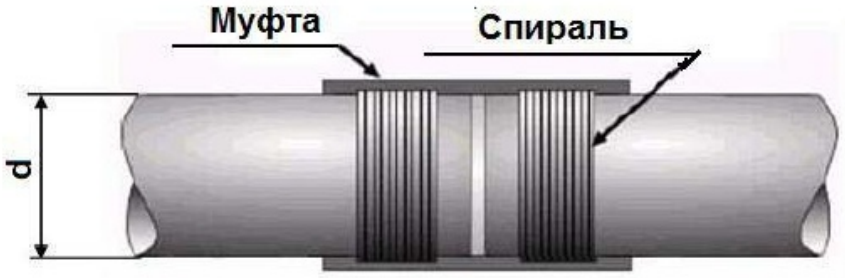
Нагретым инструментом

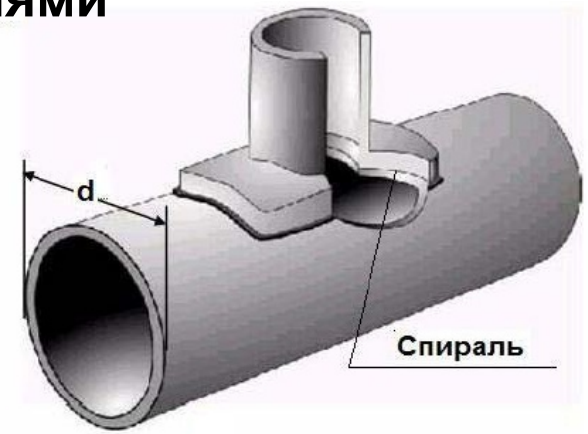
в нахлестку



в стык

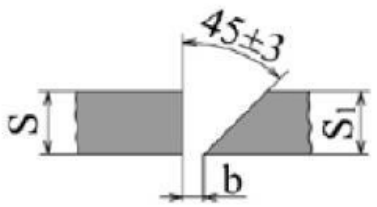
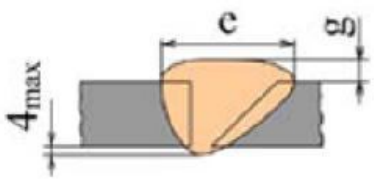
С закладными нагревателями



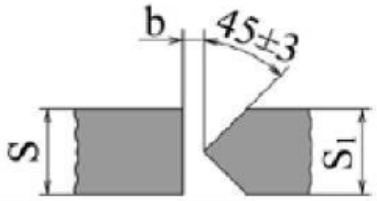
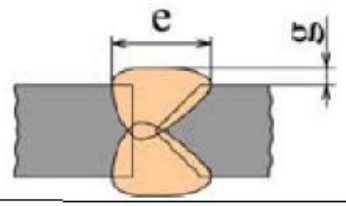


Соединения сварные из полиэтилена, полипропилена и винипласта. Основные типы, конструктивные элементы и размеры. ГОСТ 16310-80 (выдержки)

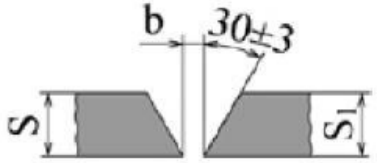
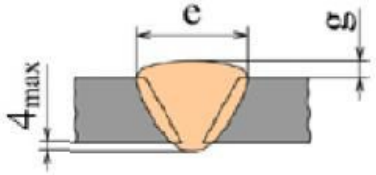
Стыковое соединение со скосом одной кромки, односторонний шов (С5)

Подготовка к сварке	Сварной шов	$S=S_1$	b	g	e
		4-6	$0,5^{+1}$	2^{+1}	10_{max}
		7-9			16_{max}
		10-12		3^{+1}	18_{max}
		13-15			20_{max}
		16-18			24_{max}
		19-20			26_{max}

Стыковое соединение с двумя симметричными скосами одной кромки, двусторонний шов (С9)

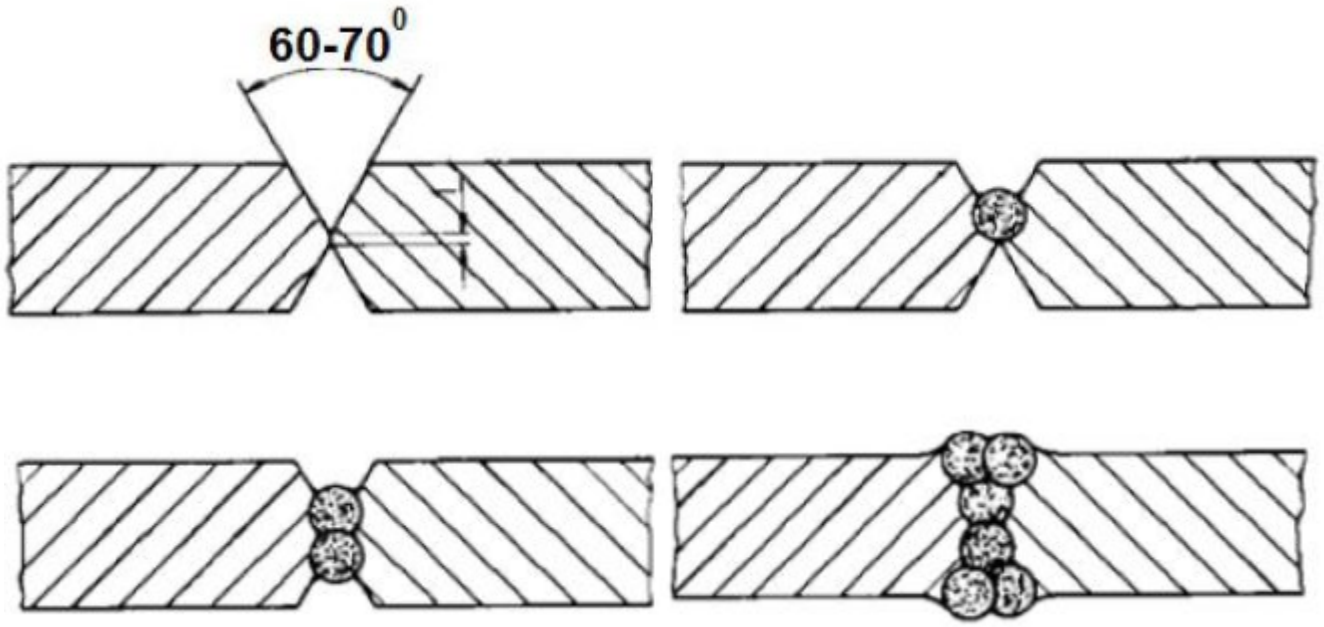
Подготовка к сварке	Сварной шов	$S=S_1$	b	g	e
		8-10	$0,5^{+1}$	2^{+1}	16_{max}
		11-13		3^{+1}	18_{max}
		14-16			20_{max}
		17-19			24_{max}
		20			26_{max}

Стыковое соединение со скосом двух кромок, односторонний шов (С10)

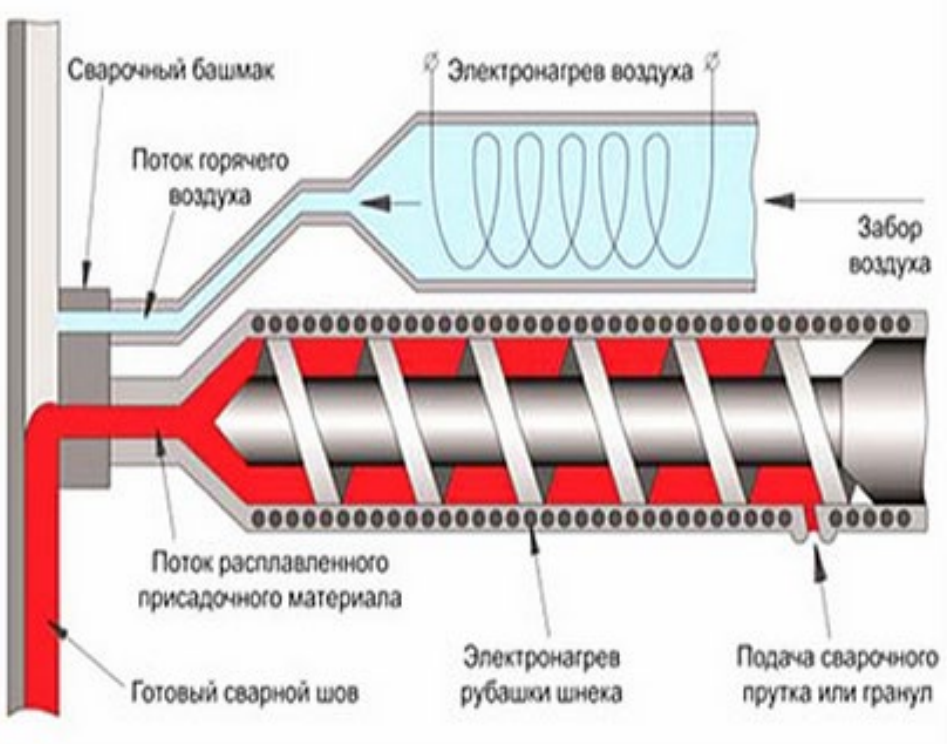
Подготовка к сварке	Сварной шов	$S=S_1$	b	g	e
		4-6	$0,5^{+1}$	2^{+1}	12_{max}
		7-9			16_{max}
		10-12		3^{+1}	18_{max}
		13-15			23_{max}
		16-18			26_{max}
		19-20			29_{max}

Сварка горячим воздухом

Многослойная сварка нагретым газом

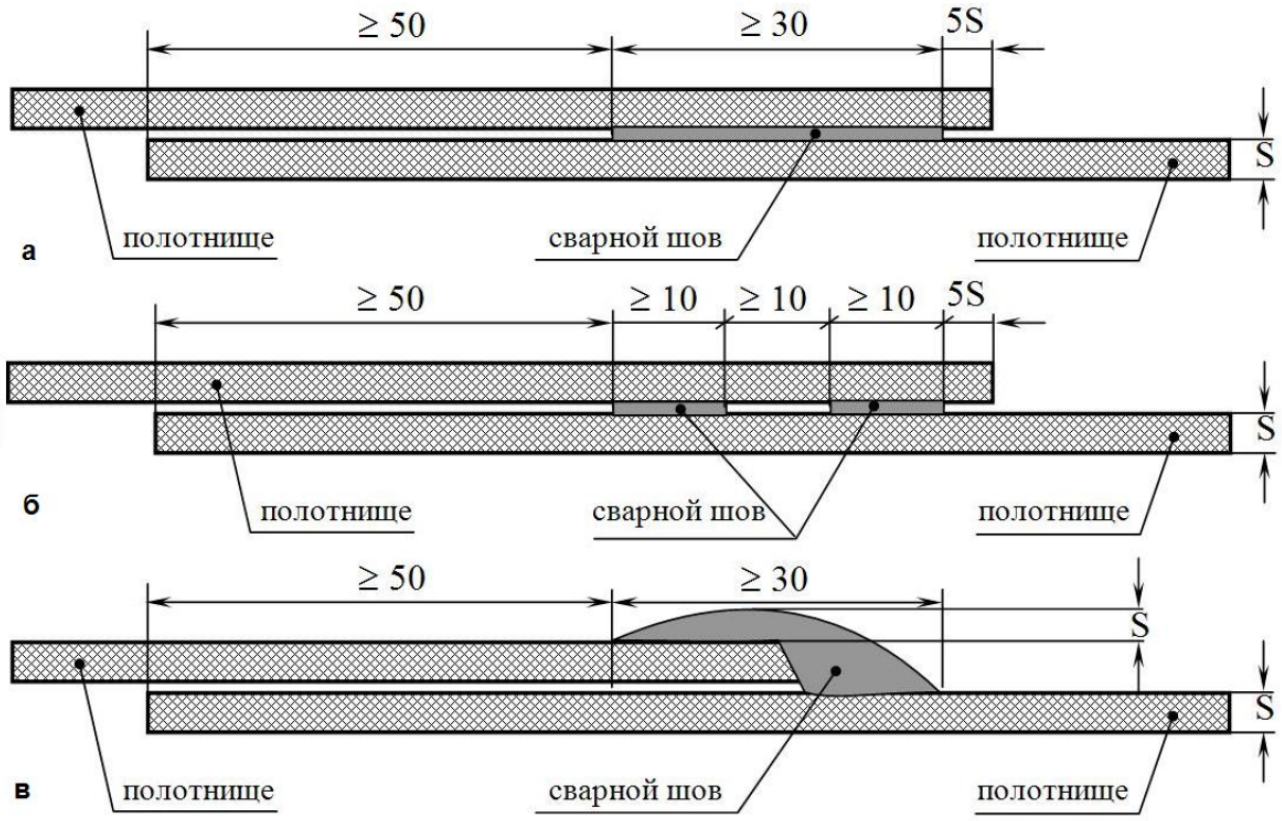


Экструзионная сварка

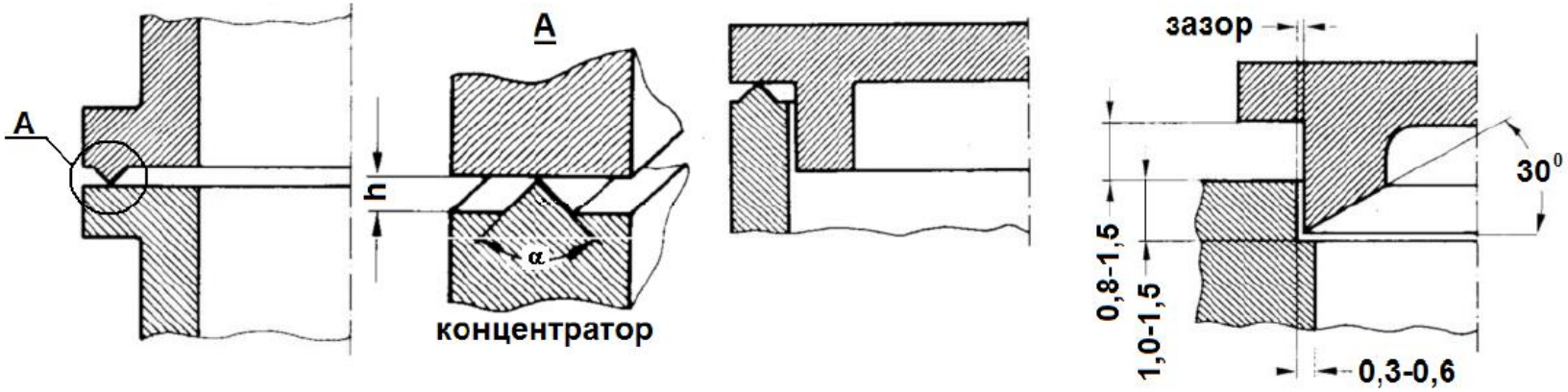


Экструзионная сварка

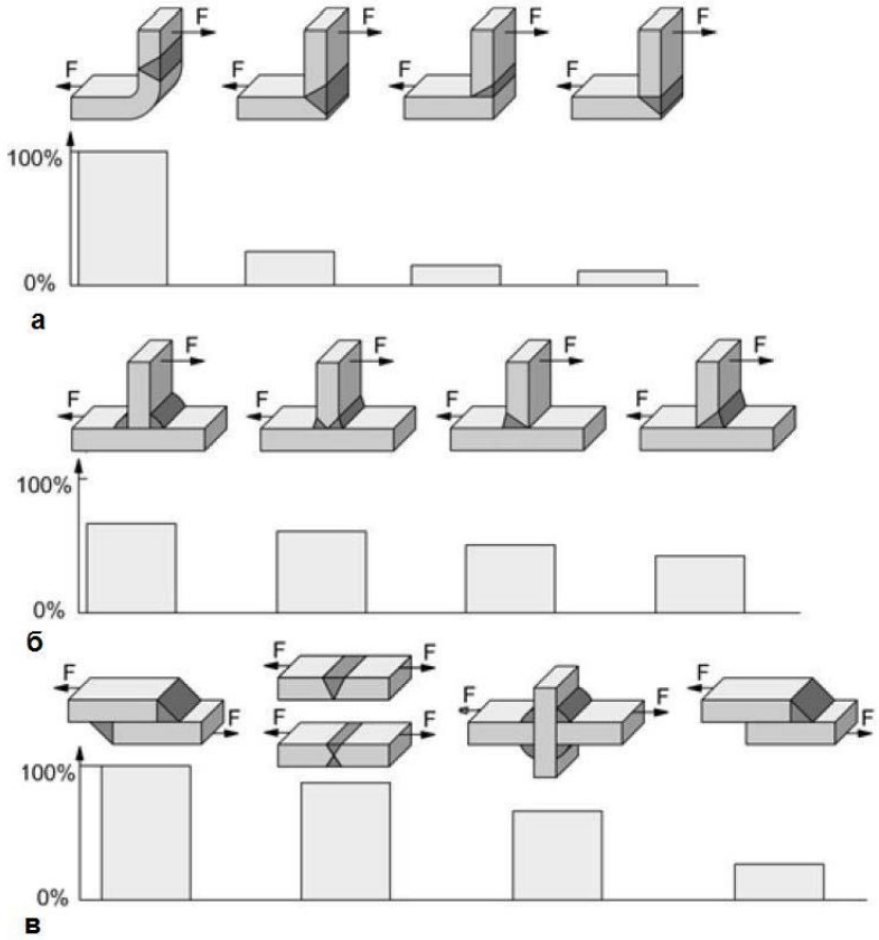
Сварные соединения полимерных полотнищ



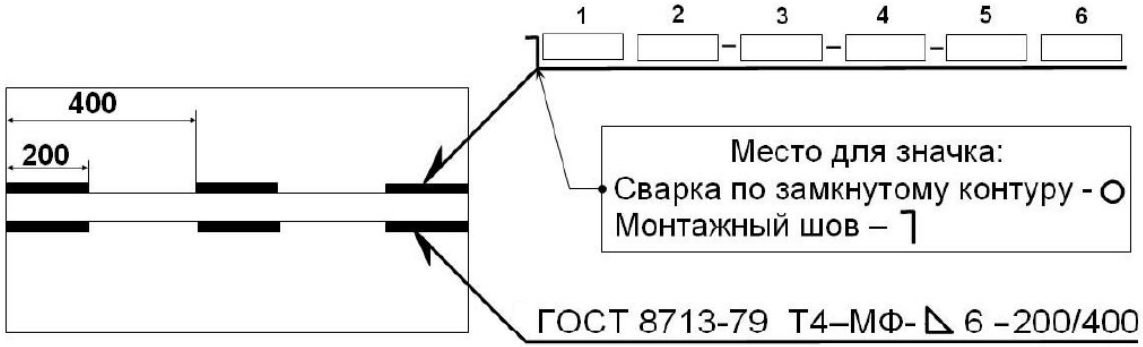
Подготовка кромок для ультразвуковой сварки



Влияние расположения швов на прочность сварных соединений термопластов



Обозначение сварных швов на чертежах по ГОСТ 2.312-72



1 - Номер стандарта, определяющего конструктивные элементы сварного соединения.

2 - Буквенно-цифровое обозначение типа шва

3 - Способа сварки по стандарту

4 - Условное обозначение углового шва и размер его катета;

5 - Знаки и размеры, характеризующие размещение прерывистых швов;

6 - Вспомогательные знаки

Вспомогательные знаки

— Усиление шва снять

— Наплывы и неровности шва обработать с плавным переходом к основному металлу

— Шов выполняется при монтаже изделия

— Шов прерывистый с цепным расположением

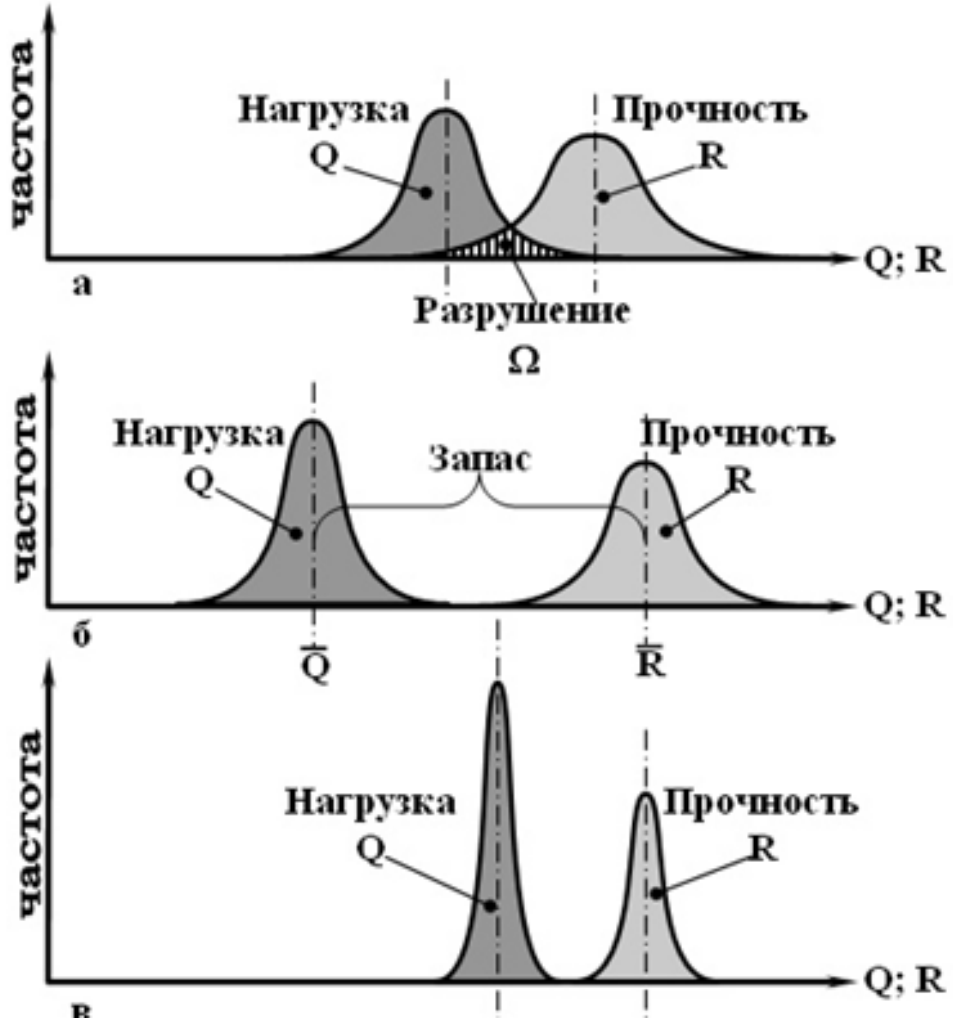
— Шов прерывистый с шахматным расположением

— Шов по незамкнутой линии

Расчеты сварных соединений

Необходимость запаса при расчете на прочность

[Нагрузка (Q)] < [Несущая способность (R)]

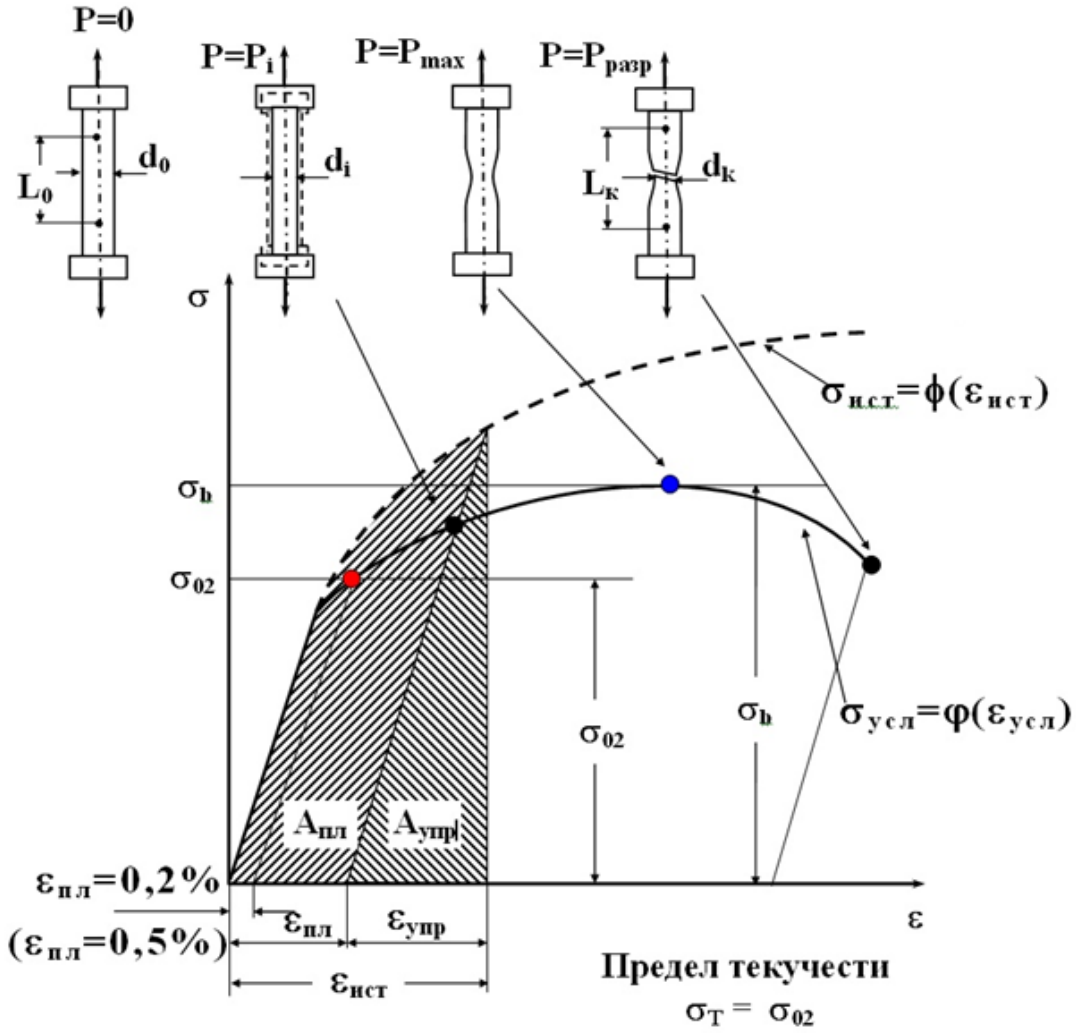


Предельные состояния сварных конструкций

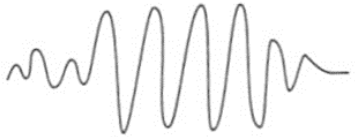
I – Нарушение несущей способности (вязкое, хрупкое, усталостное разрушение; потеря устойчивости)

II – Появление недопустимых перемещений, прогибов

Характеристики прочности и пластичности металла

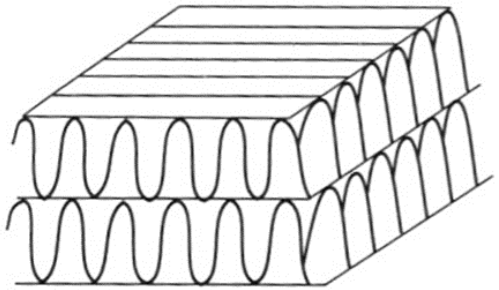


Надмолекулярная структура полимера (НМС)



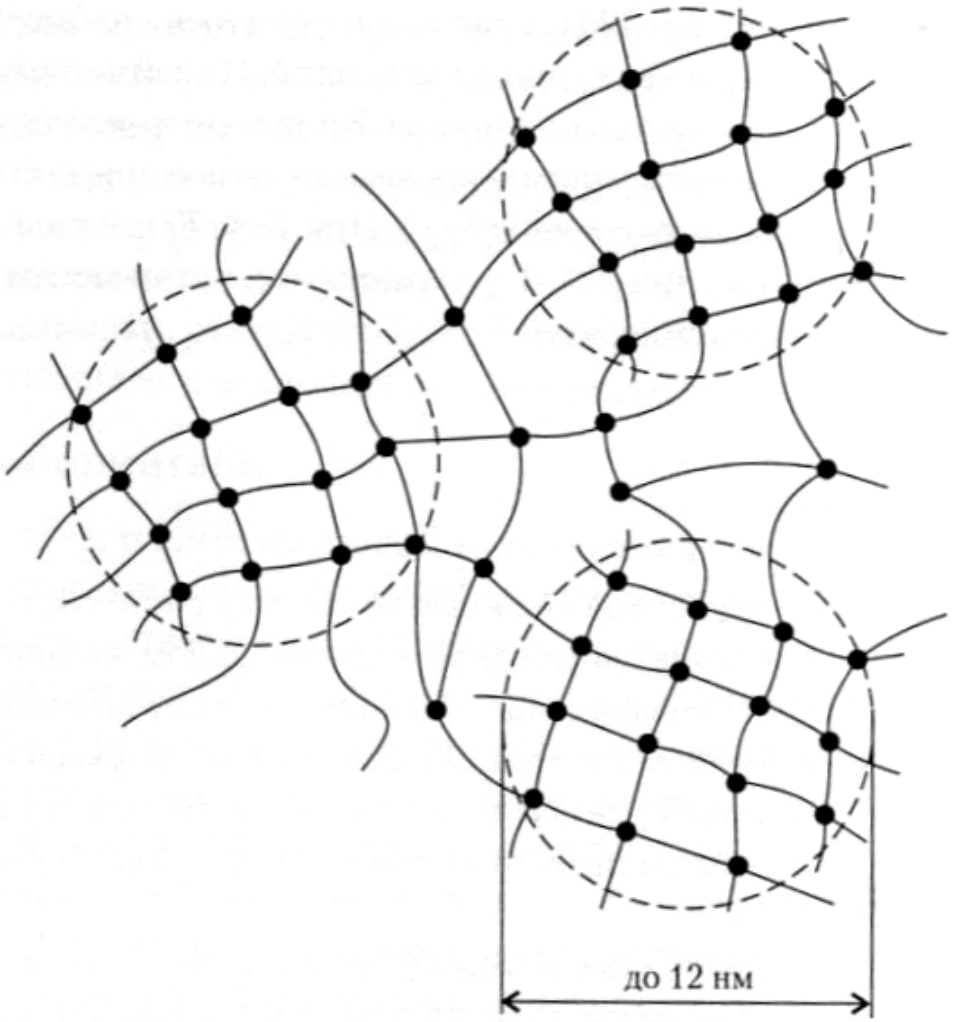
а – пачка;

б – фибрилла;

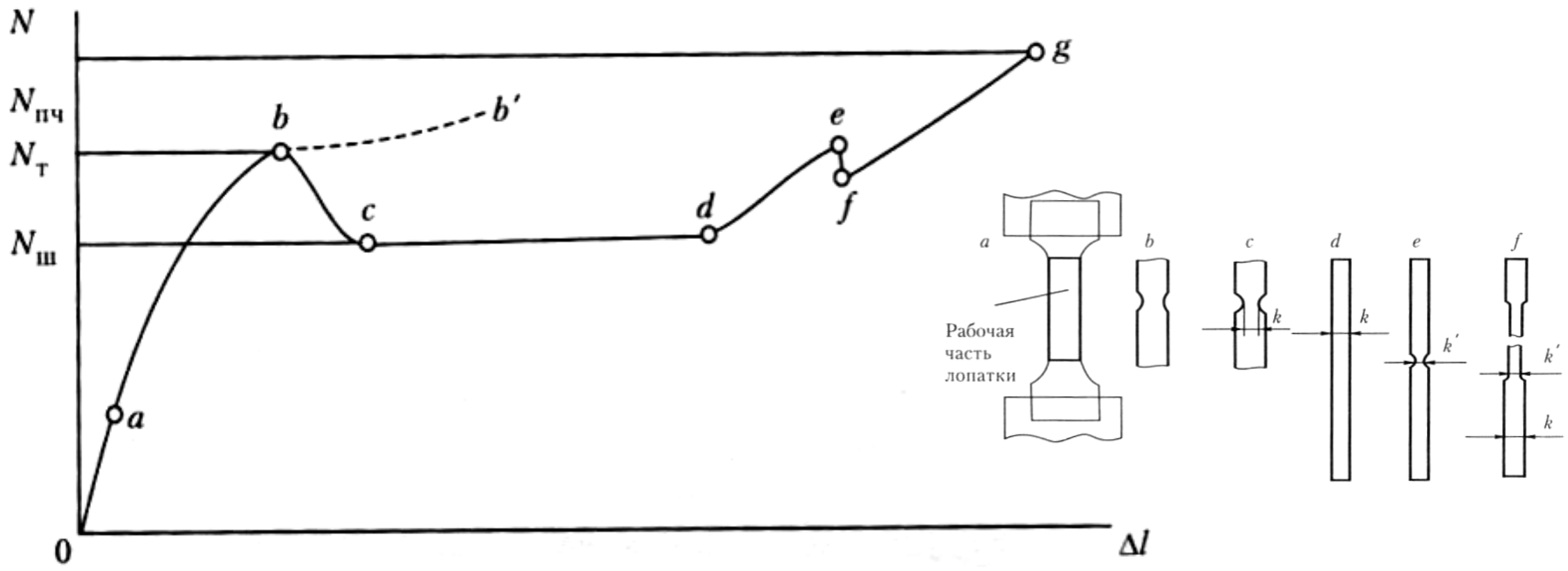


в – ламель;

г – сферолиты радиальные и кольцевые



Кривая «деформация – усилие» для полимеров



Проектный расчет сварных соединений по I предельному состоянию

$$\text{(I)} \qquad Q = \sigma = \frac{\psi \gamma_f P}{F} \le R_y (R_u) = \frac{R_{yn}(R_{un})\gamma_c}{\gamma_m \gamma_n}$$

ψ – коэффициент сочетания нагрузок (ψ = 1,0 – 0,6);

γ_f – коэффициент надежности по нагрузке (γ_f = 0,9 – 1,6);

γ_c – коэффициент условий работы (γ_c = 0,65 – 1,2);

γ_m – коэффициент надежности по материалу

(γ_m = 1,025 – 1,05), при расчете по R_{un} - γ_m = 1,3;

γ_n – коэффициент надежности по назначению (γ_n = 0,8 – 1,0)

Расчет по допускаемым напряжениям

$$Q = \sigma_н \leq \varphi_w [\sigma]$$

$$[\sigma] = \min\left\{\frac{R_m}{n_m}; \frac{R_{02}}{n_{02}}; \frac{R_{mt}}{n_{mt}}\right\}$$

$$n_m = 2,6;\ n_{02} = 1,5;\ n_{mt} = 1,5$$

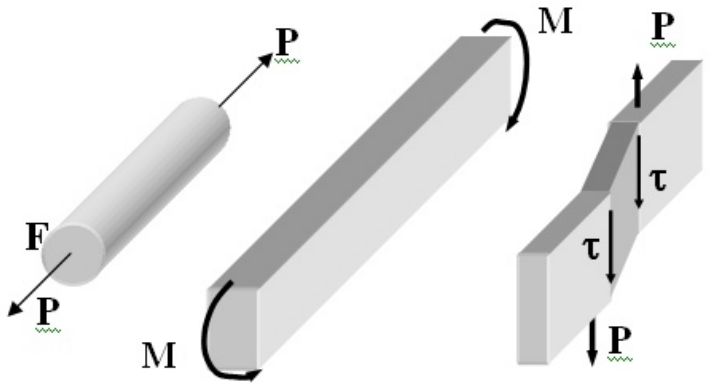
Сосуды атомного машиностроения

	Объем контроля, %			
	100	50	25	<10
φ_w	1,0	0,9	0,85	0,8

Напряженно-деформированное состояние сварных соединений

Напряжения:
1кг/мм^2 = 10 МПа = 100 кг/см^2

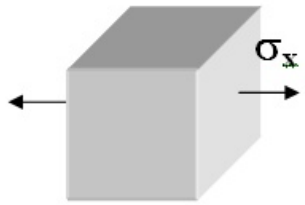
Нормальные **Касательные**



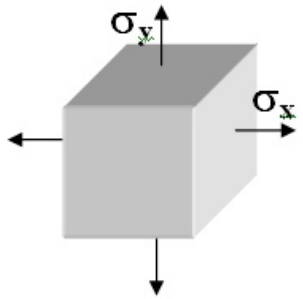
$$\sigma=\frac{P}{F} \quad \sigma=\frac{M}{W} \quad \tau=\frac{P}{F}$$

Напряженное состояние:

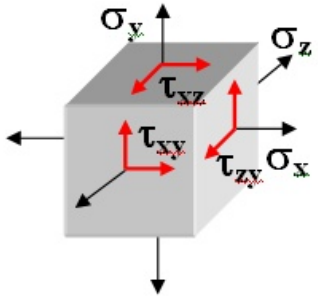
Одноосное



Двухосное



Трехосное

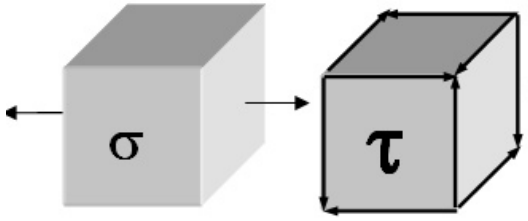


Гипотезы предельных напряженных состояний

$\sigma_{экв} = \sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_т$

$\sigma_{экв} = \sigma_1 - k\sigma_3 = \sigma_т$

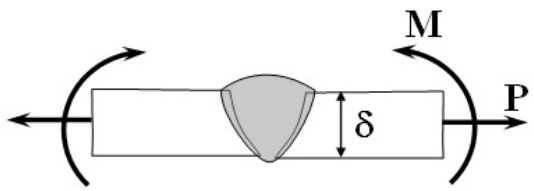
$\sigma_{экв} = \sigma_i = \sigma_т$

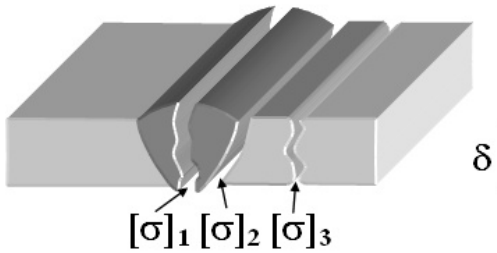


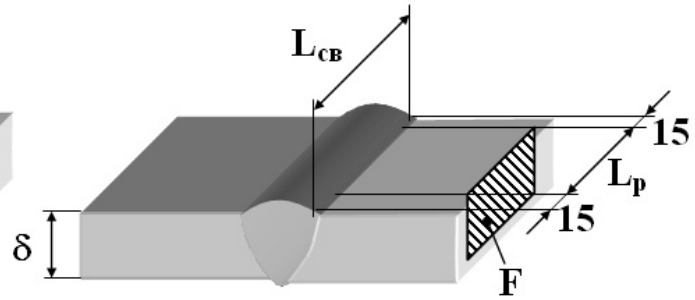
$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{(\sigma_x-\sigma_y)^2+(\sigma_x-\sigma_z)^2+(\sigma_y-\sigma_z)^2+6(\tau_{xy}^2+\tau_{xz}^2+\tau_{yz}^2)}$$

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3}\sqrt{(\varepsilon_x-\varepsilon_y)^2+(\varepsilon_x-\varepsilon_z)^2+(\varepsilon_y-\varepsilon_z)^2+6(\gamma_{xy}^2+\gamma_{xz}^2+\gamma_{yz}^2)}$$

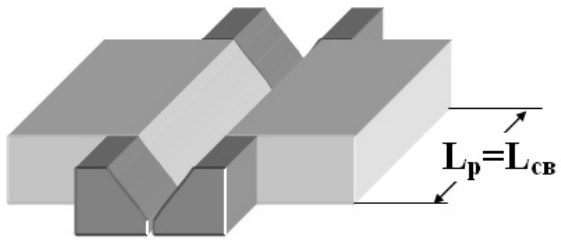
Проектный расчет сварных стыковых соединений при статическом нагружении







$L_р = L_ш - 30мм;\ \delta_р = \delta$



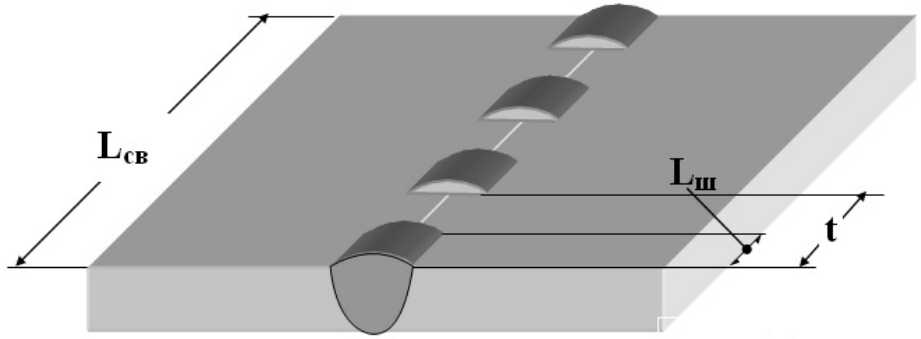
$$\sigma = \frac{P}{F} \le [\sigma];$$

$$\sigma = \frac{M}{W} \le [\sigma];$$

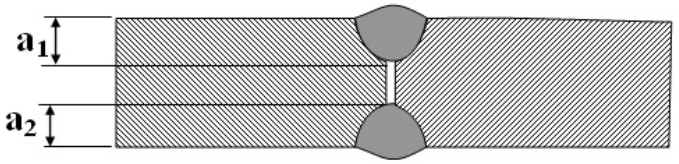
$$[\sigma] = \min\begin{cases}[\sigma]_1\\ [\sigma]_2\\ [\sigma]_3\end{cases}$$

$$F = L_р \cdot \delta_р;$$

$$W = \frac{L_р \delta^2}{6}$$



$$L_р = \frac{L_ш}{t} L_{св}$$



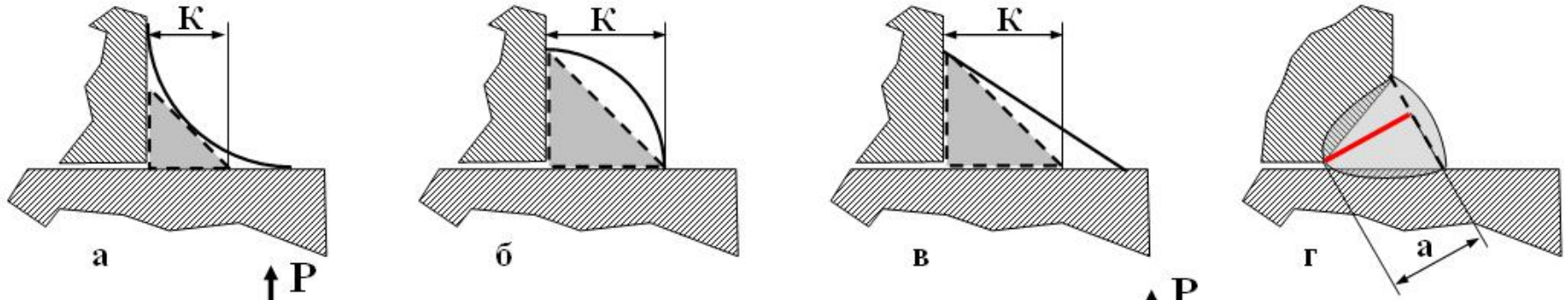
$\delta_р = a_1 + a_2$
(при растяжении соединений из вязкого материала)

Нагартованные: АМг2Н2 $[\sigma]_2$ = 65; $[\sigma]_3$ = 125 МПа

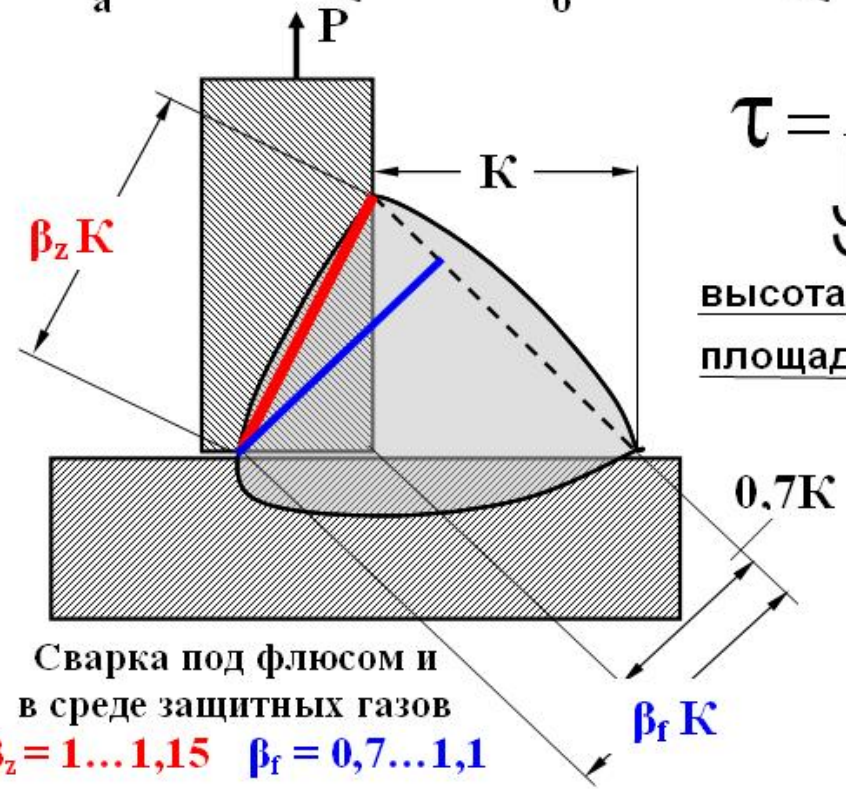
Термоупрочняемые: 1915Т1 $[\sigma]_2$ = 195 МПа; $[\sigma]_3$ = 160 МПа

Характер разрушения соединений с угловыми швами

Расчет сварных соединений с угловыми швами

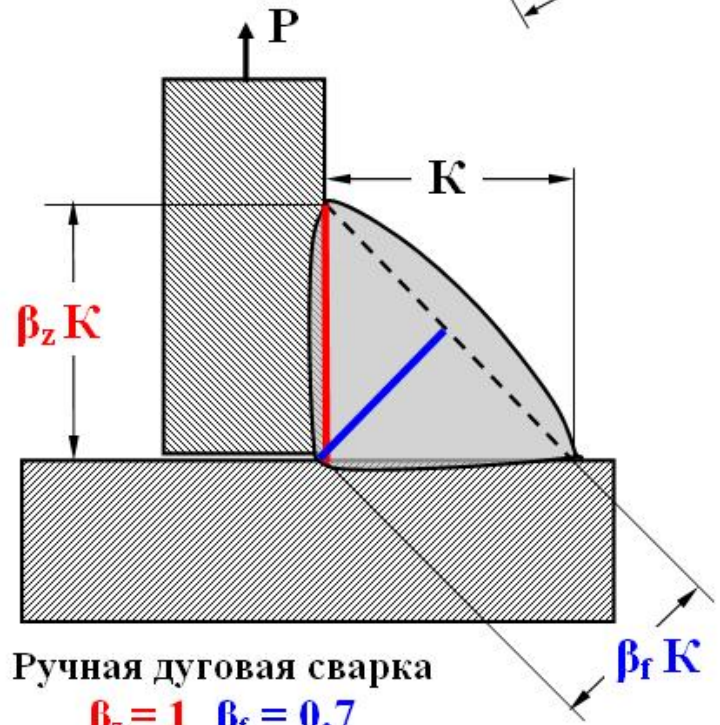


$$\tau = \frac{P}{\underbrace{\beta\, KL}_{\text{высота}\ \ \text{площадь}}}$$



Сварка под флюсом и в среде защитных газов

$\beta_z = 1 \ldots 1{,}15$ $\beta_f = 0{,}7 \ldots 1{,}1$



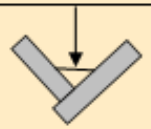
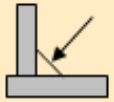
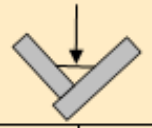
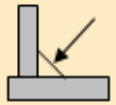
Ручная дуговая сварка

$\beta_z = 1$ $\beta_f = 0{,}7$

Условие прочности соединений с угловыми швами

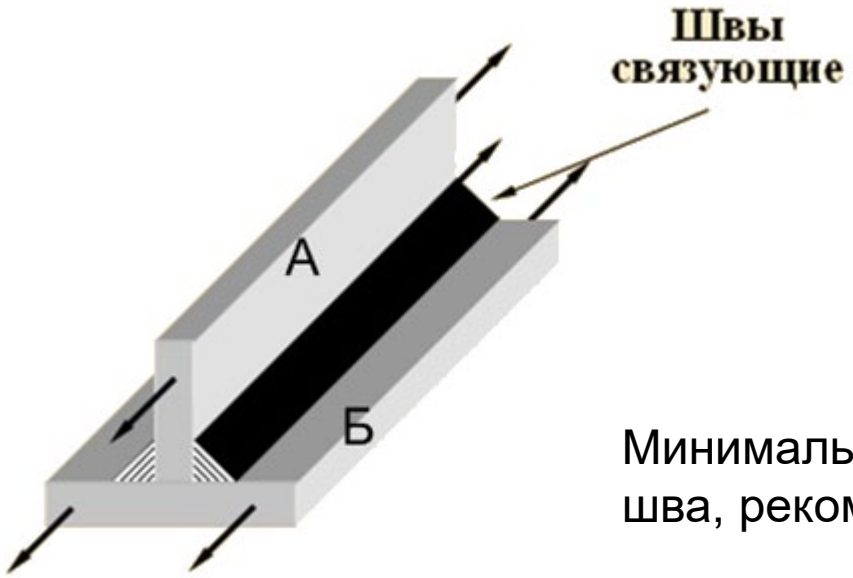
$$\tau \le \min\left\{\frac{P}{\beta_f K L_w} \le [\tau]_f;\ \frac{P}{\beta_z K L_w} \le [\tau]_z\right\};\quad [\tau]_f = R_{wf}\gamma_{wf}\quad [\tau]_z = R_{wz}\gamma_w$$

$$0{,}7 \le \beta_f \le 1{,}1 \qquad\qquad 1{,}0 \le \beta_z \le 1{,}15$$

Размер катета шва (мм)	Способ сварки, диаметр электрода d (мм)									
	Автоматическая, d = 3 – 5				Механизированная, d = 1,4 – 2,0				Механизированная, d ≤ 1,4; ручная	
									В любом пространственном положении	
	β_f	β_z	β_f	β_z	β_f	β_z	β_f	β_z	β_f	β_z
3 – 8	1,1	1,15	1,1	1,15	0,9	1,05	0,9	1,05	0,7	1,0
9 – 12			0,9	1,05			0,8	1,0		
14 – 16					0,8	1,0	0,7			
≥ 18	0,7	1,0	0,7	1,0	0,7					

При $\sigma_{02} \ge 580$ МПа $\beta_f = 0{,}7$; $\beta_z = 1{,}0$

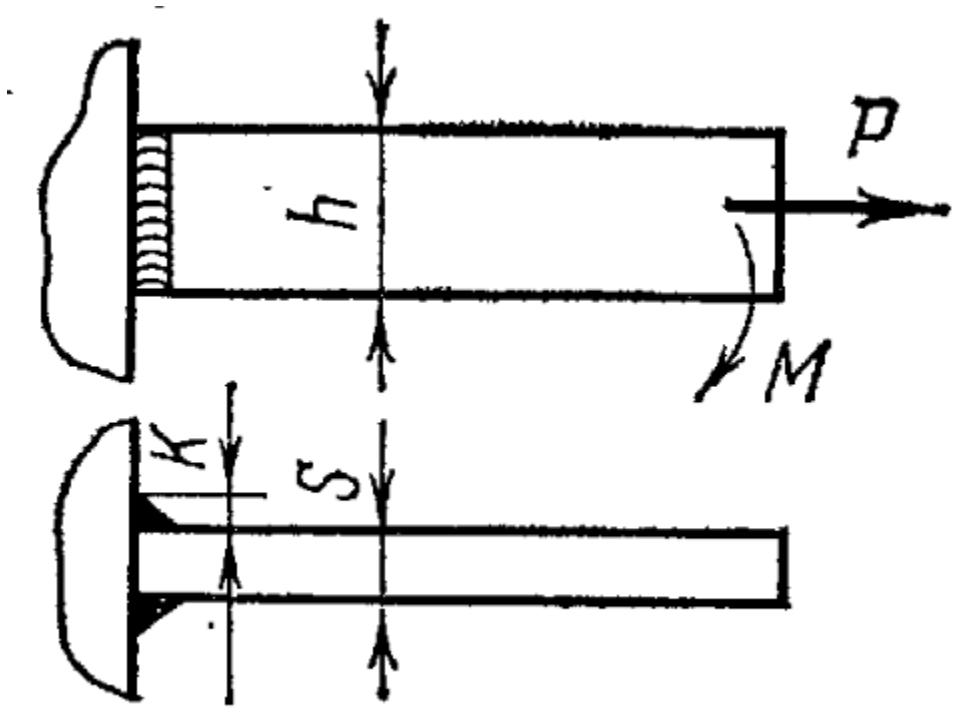
Сварные швы со связующими швами



Минимальные значения катета углового шва, рекомендуемое СНиП II-23-81

Предел текучести материала, МПА	Толщина наиболее толстого элемента, мм				
	6 - 10	11 - 16	17 - 32	23 - 32	33 - 40
225 - 275	4	4	5	5	6
310 - 390	4	5	6	7	8
410 - 440	5	6	7	8	9

Расчет тавровых сварных соединений

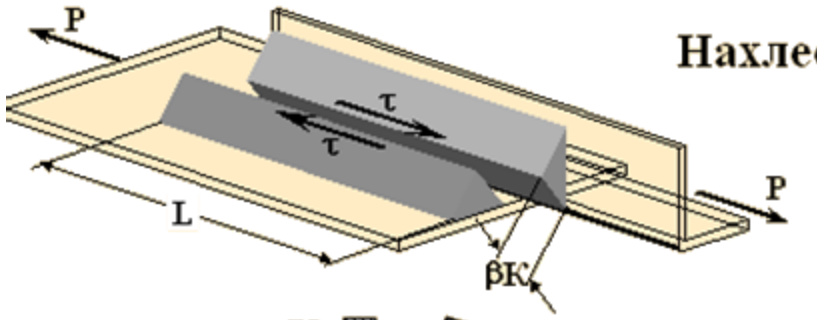


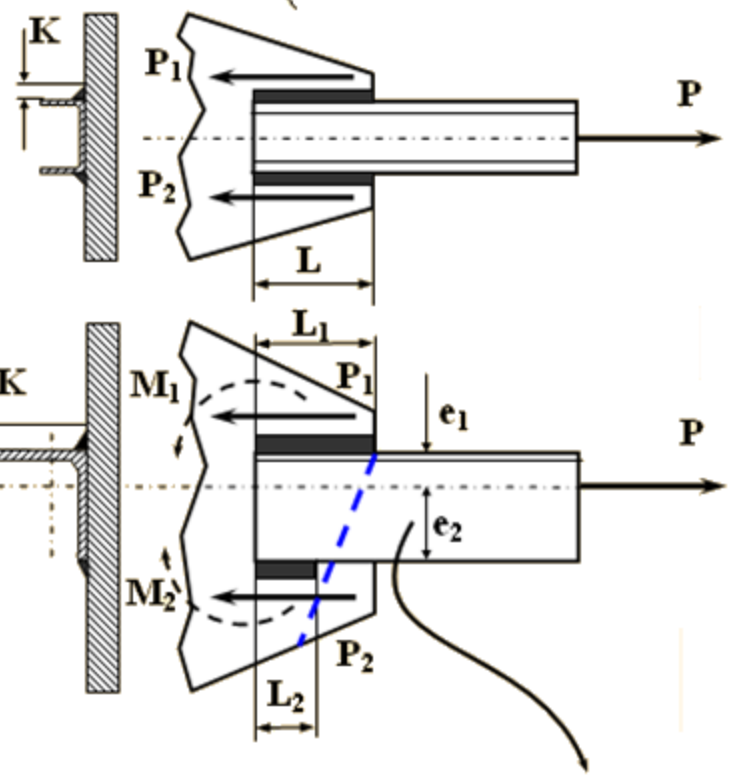
$$\tau = M/W_c + P/F_c \leqslant [\tau']$$

$$W_c = \frac{2\beta K h^2}{6}$$

$$F_c = 2\beta K h$$

Нахлесточное соединение, нагруженное в продольном направлении





$$P = P_1 + P_2$$

$$P_1 = P_2 = F\,[\tau]_{св}$$

$$P = 2\,\beta\,K\,L\,[\tau]_{св}$$

$$\sum P = 0; \quad P = P_1 + P_2$$

$$P_1 = \beta\,K_1 L_1\,[\tau]_{св}$$

$$P_2 = \beta\,K_2 L_2\,[\tau]_{св}$$

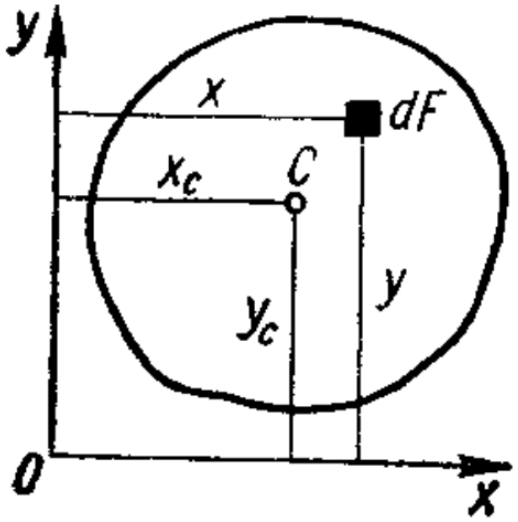
$$\sum M = 0; \quad P_1 e_1 = P_2 e_2$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{e_2}{e_1}; \quad \text{при}\, K_1 = K_2 \Rightarrow \frac{e_2}{e_1} = \frac{L_1}{L_2}$$

$$P = \beta\,K\,(L_1 + L_2)\,[\tau]_{св}$$

<u>Чем дальше шов от линии действия силы, тем меньше его расчетная длина</u>

Статический момент сечения

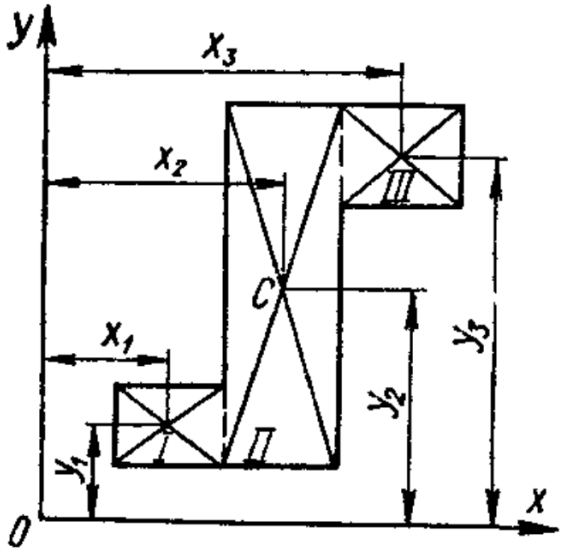


$$S_x = \int_F y\,dF; \quad S_y = \int_F x\,dF$$

$$S_x = F y_C; \quad S_y = F x_C$$

$$x_C = \frac{S_y}{F}; \quad y_C = \frac{S_x}{F}$$

Определение центра тяжести сложной фигуры

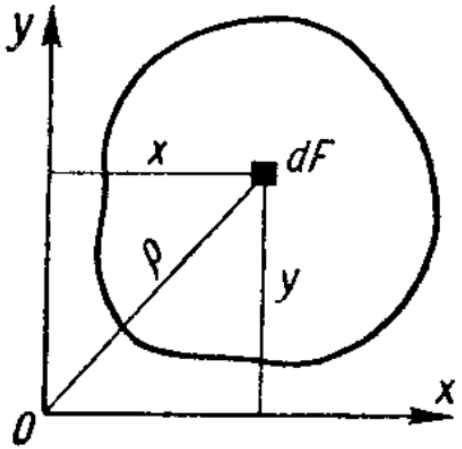


$$S_x = F_1 y_1 + F_2 y_2 + \cdots + F_n y_n = \sum_{i=1}^{n} F_i y_i;$$

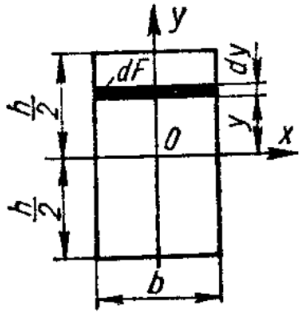
$$S_y = F_1 x_1 + F_2 x_2 + \cdots + F_n x_n = \sum_{i=1}^{n} F_i x_i.$$

$$x_C = \frac{S_y}{F} = \frac{\sum_{i=1}^{n} F_i x_i}{\sum_{i=1}^{n} F_i}; \quad y_C = \frac{S_x}{F} = \frac{\sum_{i=1}^{n} F_i y_i}{\sum_{i=1}^{n} F_i}$$

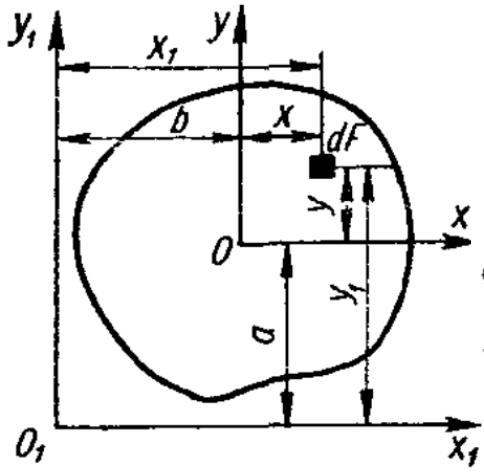
Момент инерции сечения



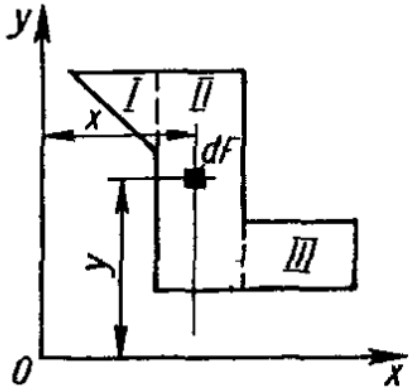
$$J_x = \int_F y^2\,dF; \quad J_y = \int_F x^2\,dF$$



$$J_x = \int_F y^2\,dF = \int_{-h/2}^{h/2} y^2 b\,dy = \frac{bh^3}{12}$$



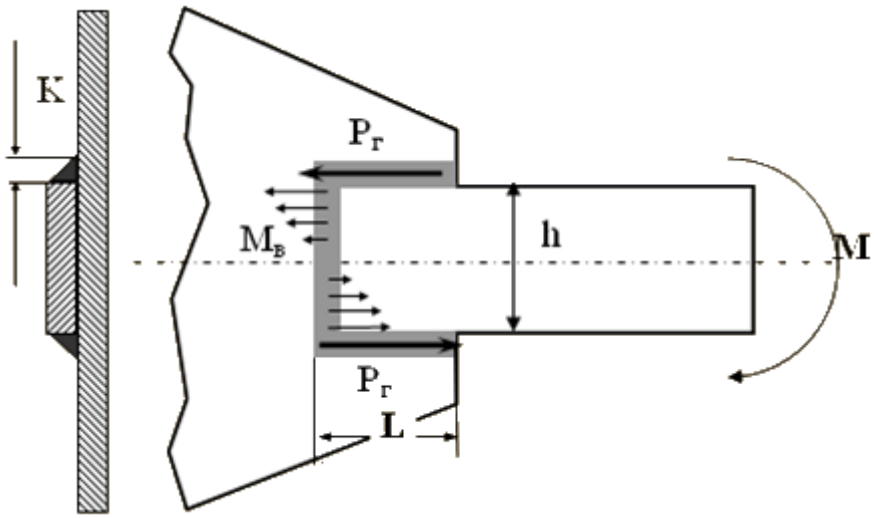
$$J_{x_1} = J_x + a^2F$$
$$J_{y_1} = J_y + b^2F$$



$$J_x = J_x^{\mathrm{I}} + J_x^{\mathrm{II}} + J_x^{\mathrm{III}}$$

Нахлёсточное соединение нагруженное моментом в плоскости

Метод расчленения соединения на составляющие



$$M = M_г + M_в$$

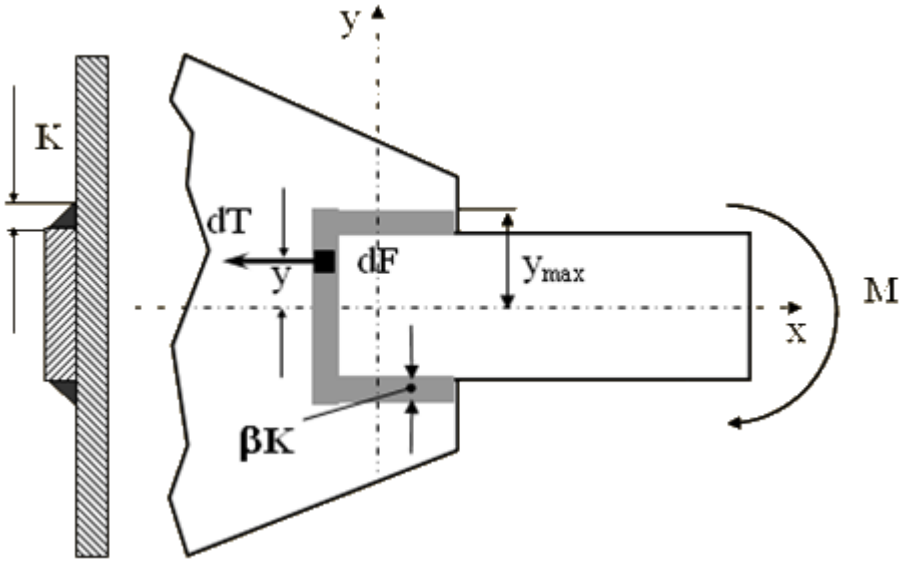
$$M_г = P_г\,(h+K) = \beta\,K\,L\,\tau\,(h+K)$$

$$M_в = W\tau = \frac{\beta K h^2}{6}\tau$$

$$\boxed{\tau = \frac{M}{\beta K\left[L(h+K)+\frac{h^2}{6}\right]} \le [\tau]_в}$$

Нахлесточное соединение нагруженное моментом в плоскости

Метод осевого момента инерции



$$dM = y\,dT$$

$$M = \int_F y\,dT = \int_F y\tau\,dF$$

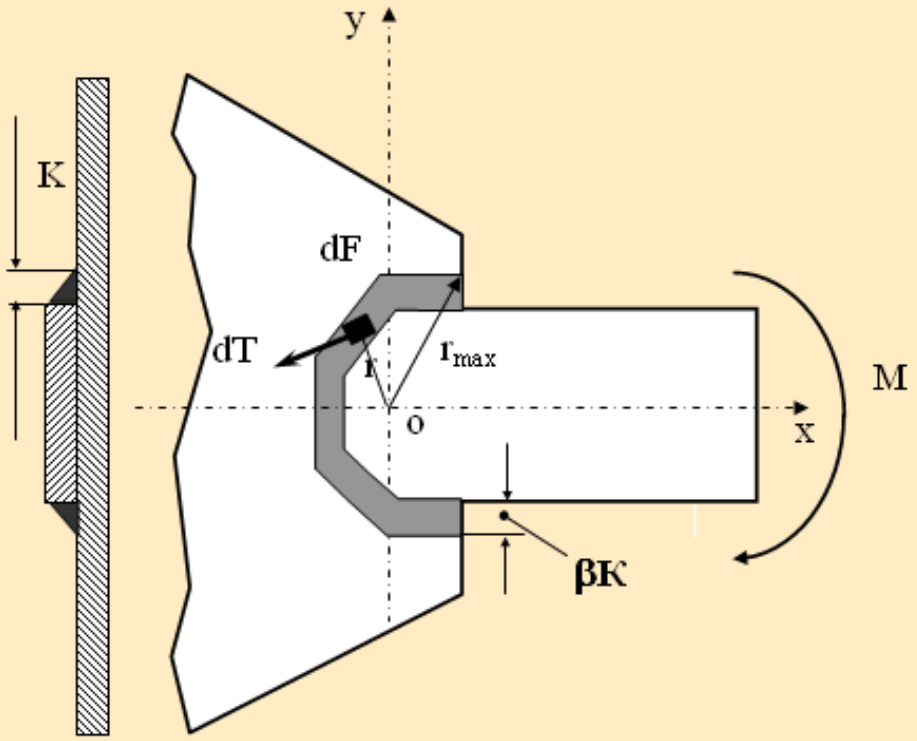
$dT = \tau\,dF$ $\qquad$ $\tau = \tau_1 y$

J_x – осевой момент инерции

$$M = \tau_1 \int_F y^2\,dF$$

$$\tau_{max} = \frac{M}{J_x} y_{max} \le [\tau]_{св}$$

Нахлесточное соединение, нагруженное моментом в плоскости (Метод полярного момента инерции)



$$dT = \tau\, dF$$

$$dM = r\,dT$$

$$M = \int_F r\,dT = \int_F \tau r\,dF$$

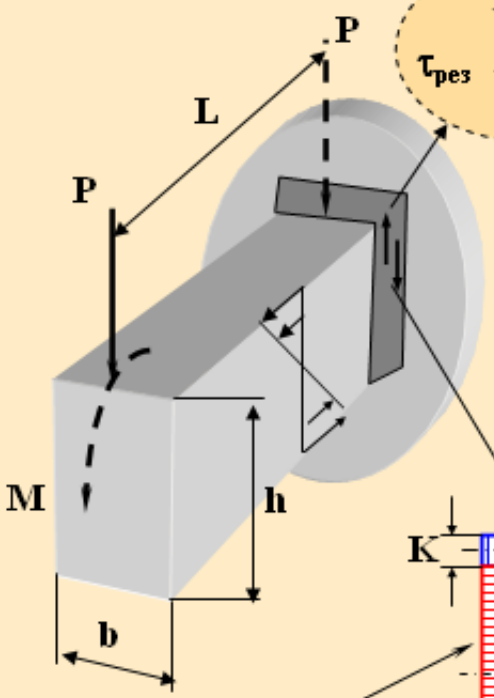
$$\tau = \tau_1 r$$

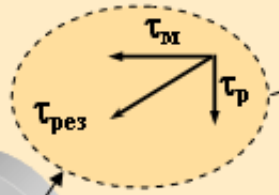
$$M = \tau_1 \int_F r^2 dF$$

$$J_p = J_x + J_y$$ – полярный момент инерции

$$\tau_{max} = \frac{M}{J_p} r_{max} \le [\tau]_{св}$$

Угловые швы, прикрепляющие балку





$$\tau_{рез} = \sqrt{\tau_M^2 + \tau_P^2}$$

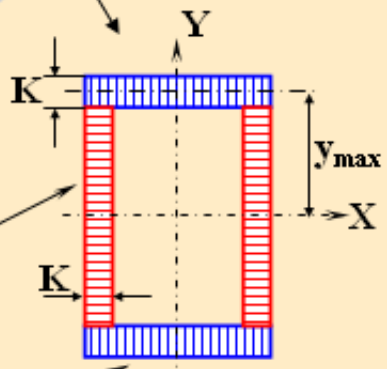
$$\tau_P = \frac{P}{F_в}$$

$$F_в = 2\,\beta\,K\,h$$

$$\tau_M = \frac{M}{I_c} y_{max}$$

Принято:
<u>Силу P воспринимают только швы, направленные вдоль силы</u>

$$M = PL; \quad I_c = \beta I; \quad y_{max} = h/2 + K$$



вертикальные швы

горизонтальные швы

$$I = I_в + I_г;$$

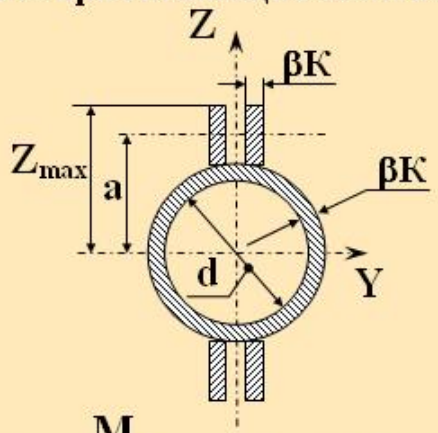
$$I_в = \frac{Kh^3}{12}; \quad I_г = \cancel{\frac{(b+2K)K^3}{12}} + bKy_{max}^2$$

<<

$$\tau_{рез} = \sqrt{\left(\frac{M}{I_c} y_{max}\right)^2 + \left(\frac{P}{F_в}\right)^2} \le [\tau]_{св}$$

Расчет прикрепляющих швов
(пример)

Сечение швов, воспринимающих момент



$$\tau_м = \frac{M}{I_y} Z_{max};\ I_y = I_y^т + 4I_y^р;$$

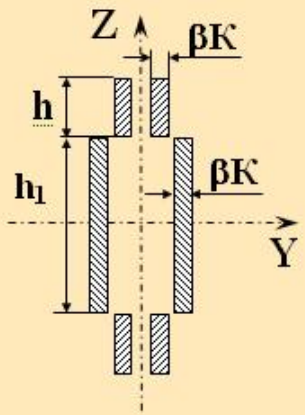
$$I_y^т = \frac{\pi(d+2\beta K)^4}{64}\left(1-\frac{(d+2\beta K)^4}{d^4}\right);$$

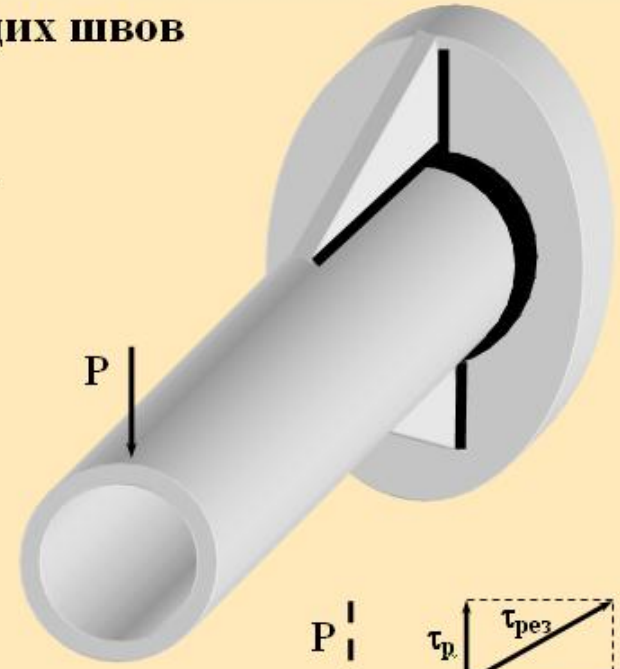
$$I_y^р = \left(I_c^р + \beta K h a^2\right);\ I_c^р = \frac{\beta K h^3}{12}$$

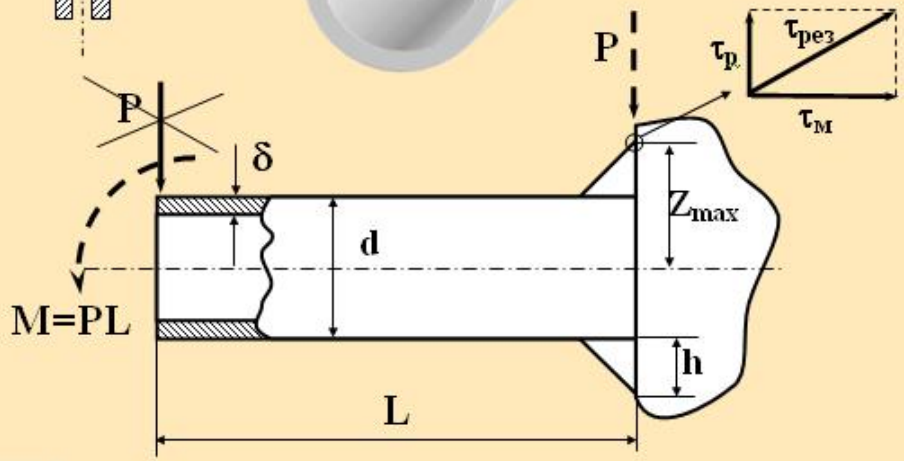
$$\tau_р = \frac{P}{\sum F};\ h_1 = d + 2\beta K$$

$$\sum F = 2\beta K(2h + h_1)$$

Сечение швов, воспринимающих силу

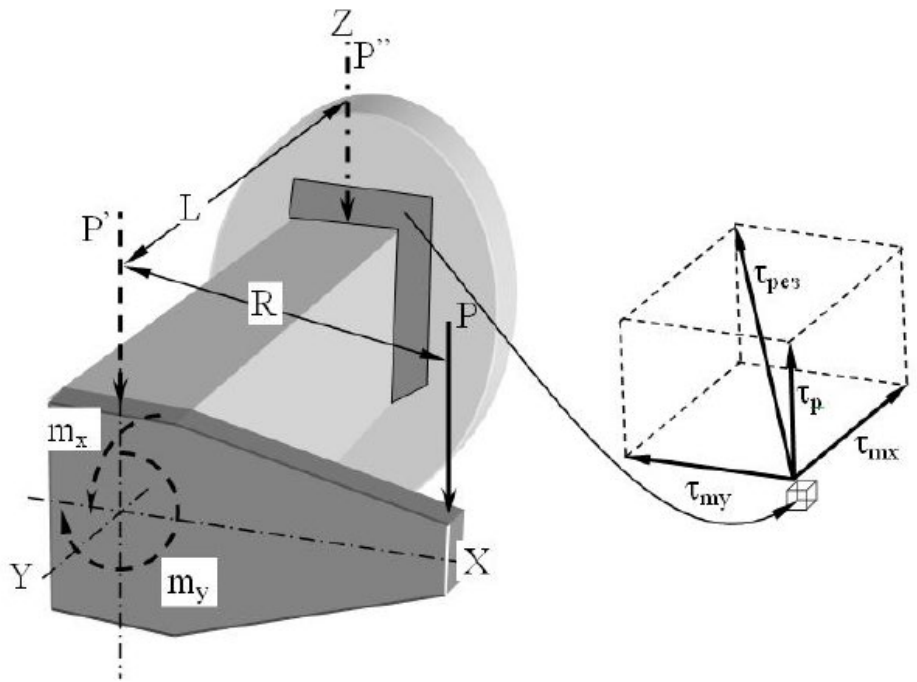






$$\tau_{рез} = \sqrt{\tau_р^2 + \tau_м^2} \le [\tau] \approx R_w \gamma_w \gamma_c$$

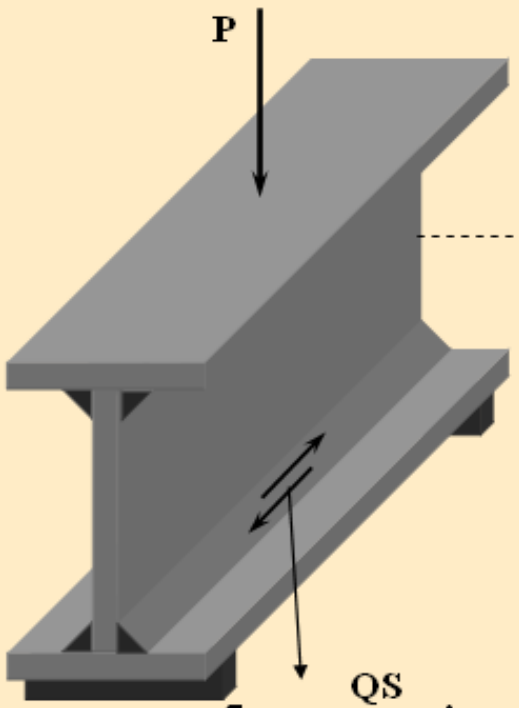
Расчет угловых швов прикрепляющие балку сила смещена относительно оси



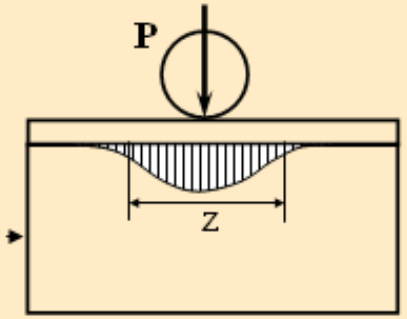
$$\tau_{рез} = \sqrt{\left(\frac{m_y}{J_x + J_z}\sqrt{x_{max}^2 + z_{max}^2}\right)^2 + \left(\frac{m_x}{J_x} z_{max}\right)^2 + \left(\frac{P}{F_в}\right)^2}$$

τ_{my} $(x_{max};\ z_{max})$ τ_{mx} τ_p

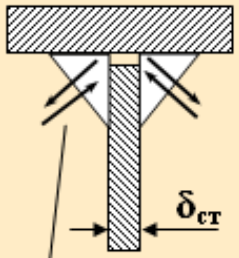
Поясные швы балок



$$\tau_Q = \frac{QS}{2\beta K I_x};$$



$$z = 3{,}25\sqrt[3]{\frac{I_п}{\delta_{ст}}}$$



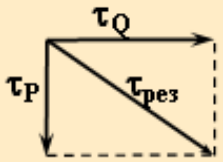
$$\tau_p = \frac{nP}{2z\beta K}$$

$I_п$ – момент инерции полки;

n = 0… 1,0 (n = 0,4) – влияние зазора

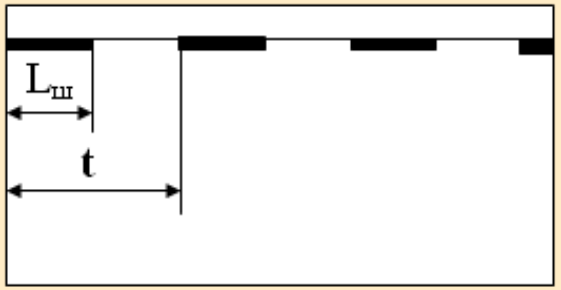
при полном проплавлении стенки

$$\tau_Q = \frac{QS}{\delta_{ст} I_x};$$



$$\boxed{\tau_{рез} = \sqrt{\tau_Q^2 + \tau_p^2} \le [\tau]_{св}}$$

Прерывистые поясные швы



$$T = \frac{QS}{I_x} t$$

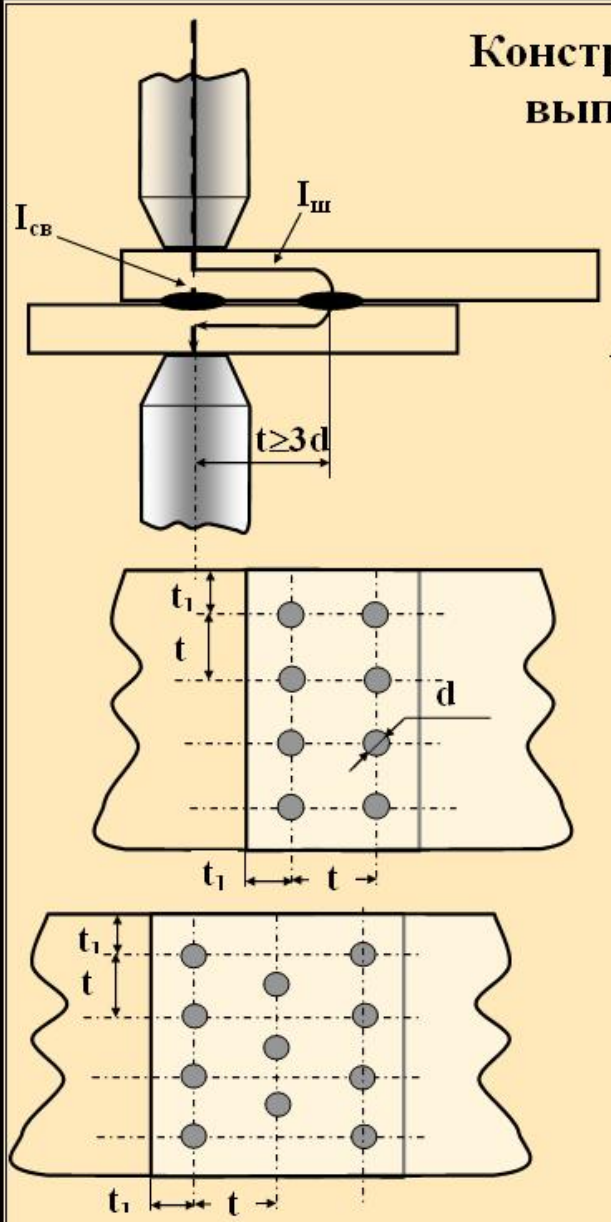
$$\tau_Q = \frac{T}{2F_{шв}} = \frac{QS}{2\beta K I_x} \cdot \frac{t}{L_ш} \le [\tau]_{св}$$

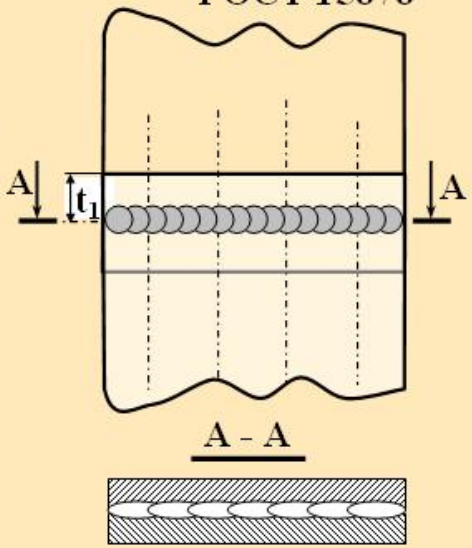
$F_{шв}$

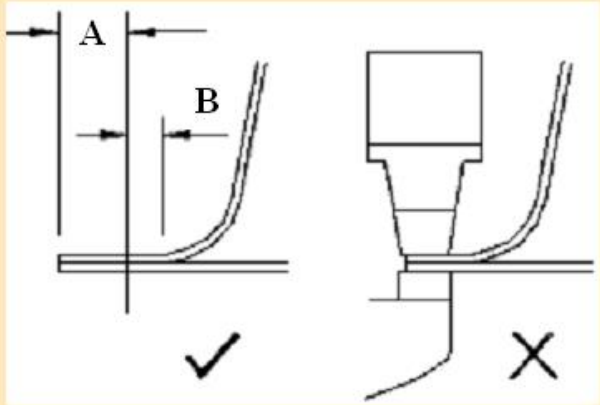
I_x – момент инерции поперечного сечения балки;
S – статический момент поперечного сечения полки

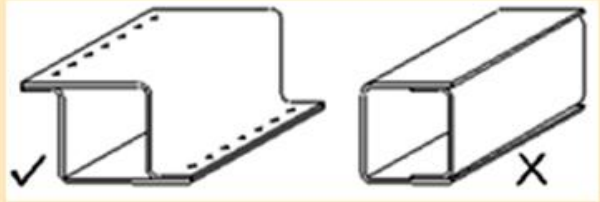
Конструктивные элементы соединений, выполненные контактной сваркой

ГОСТ 15878



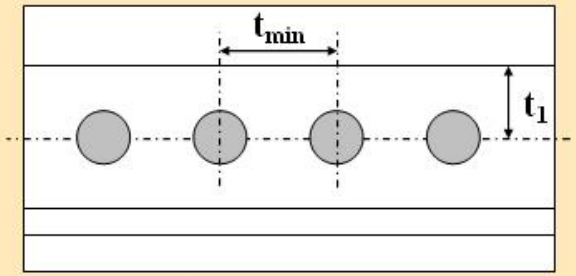


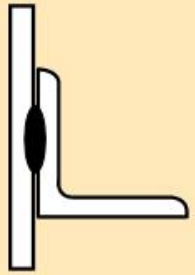




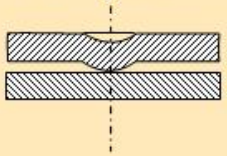
$d = 1{,}2\delta + 4$мм,
при $\delta < 3$ мм;
$d = 1{,}5\delta + 5$мм,
при $\delta > 3$ мм

$t \geq 3d$,
$t_1 = 1{,}5d$

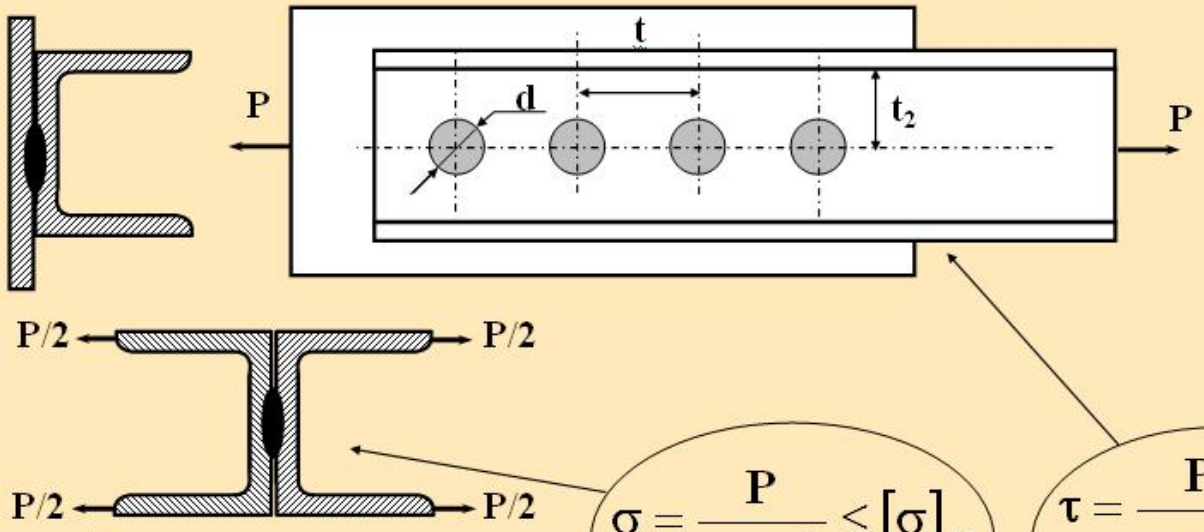




Рельефная сварка



Расчет сварных соединений, выполненных точечной сваркой



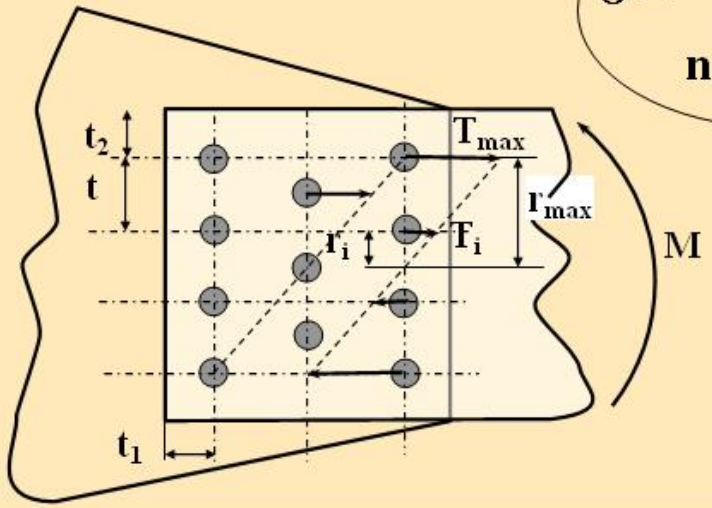
$d = 1{,}2\delta + 4$мм, при $\delta < 3$ мм;
$d = 1{,}5\delta + 5$мм, при $\delta > 3$ мм

$t = 3\delta$,
$t_1 = t_2 = 1{,}5\delta$

$$[\tau]_т \le 0{,}5[\sigma];$$
$$[\sigma]_{от} = 0{,}25...0{,}3[\sigma]$$

$$\sigma = \frac{P}{n\frac{\pi d^2}{4}} \le [\sigma]_{от}$$

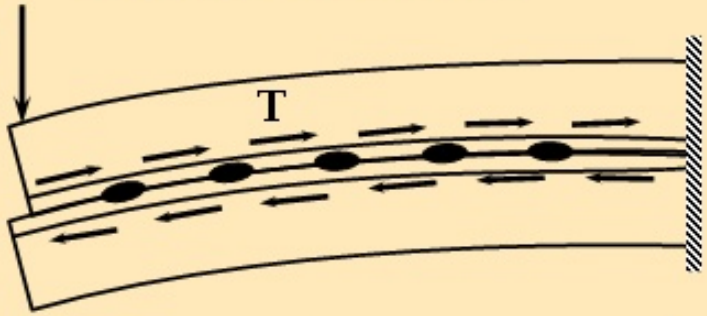
$$\tau = \frac{P}{n\frac{\pi d^2}{4}} \le [\tau]_т$$

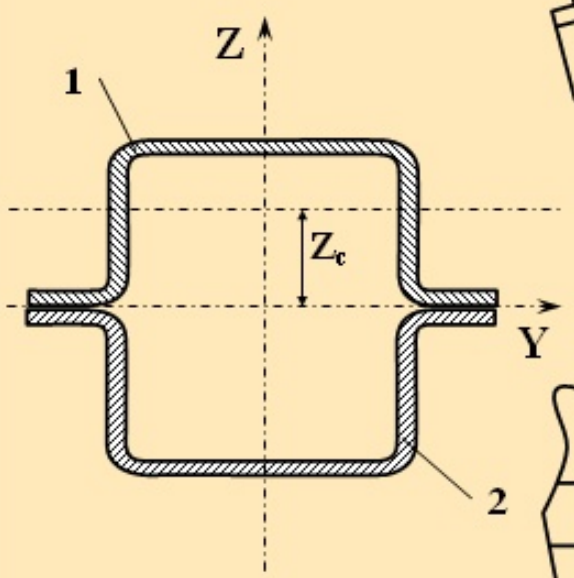


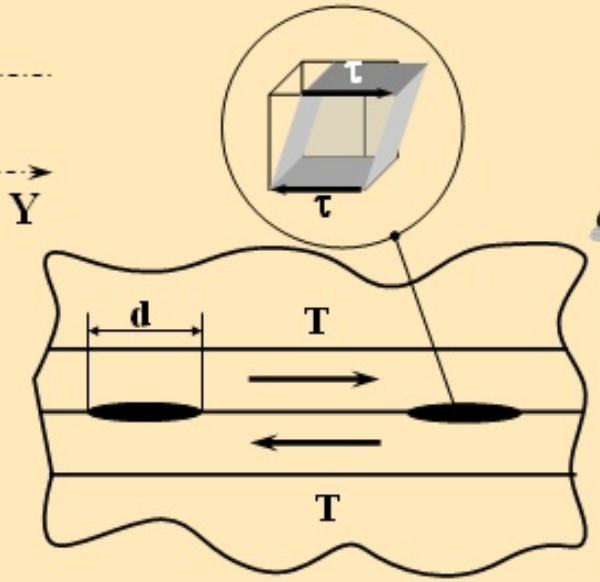
$$M = \sum m_i;\ \ m_i = T_i r_i;\ \ T_i = T_1 r_i;\ \ M = T_1 \sum r_i^2;$$

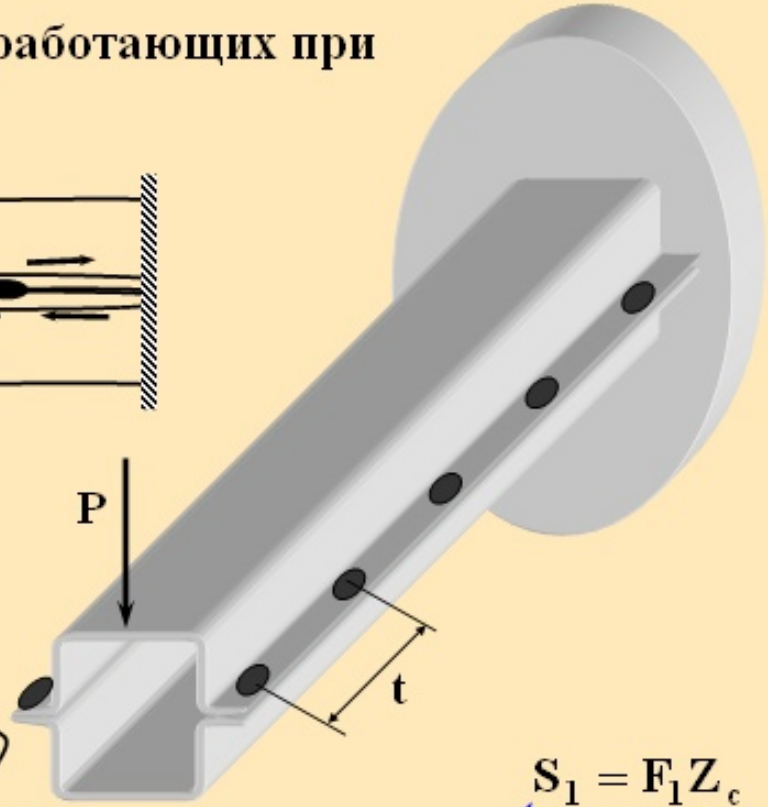
$$T_{max} = T_1 r_{max} = \frac{M}{\sum r_i^2} r_{max};\quad \tau = \frac{4T_{max}}{\pi d^2} \le [\tau]$$

Расчет точечных соединений балок, работающих при поперечном изгибе









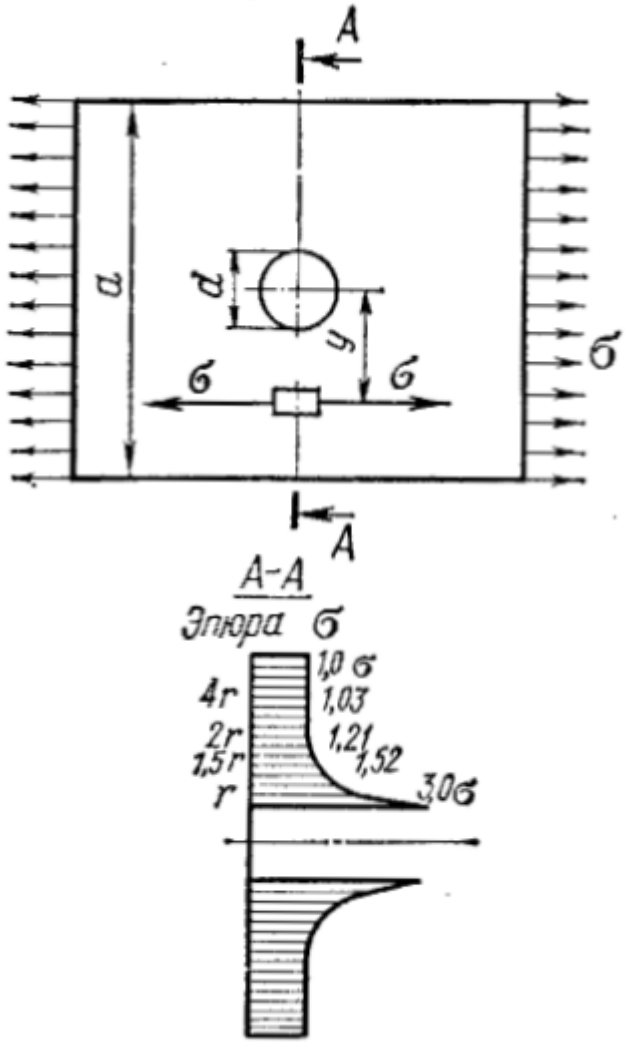
$$S_1 = F_1 Z_c$$

$$T = \frac{Q_{max} S_1}{I_y} \cdot \frac{t}{d};$$

$$\tau = \frac{T}{F_т} = \frac{4T}{\pi d^2} \le [\tau]_т$$

Для консольной балки с силой, приложенной к ее концу $Q_{max} = P$

Концентрация напряжений



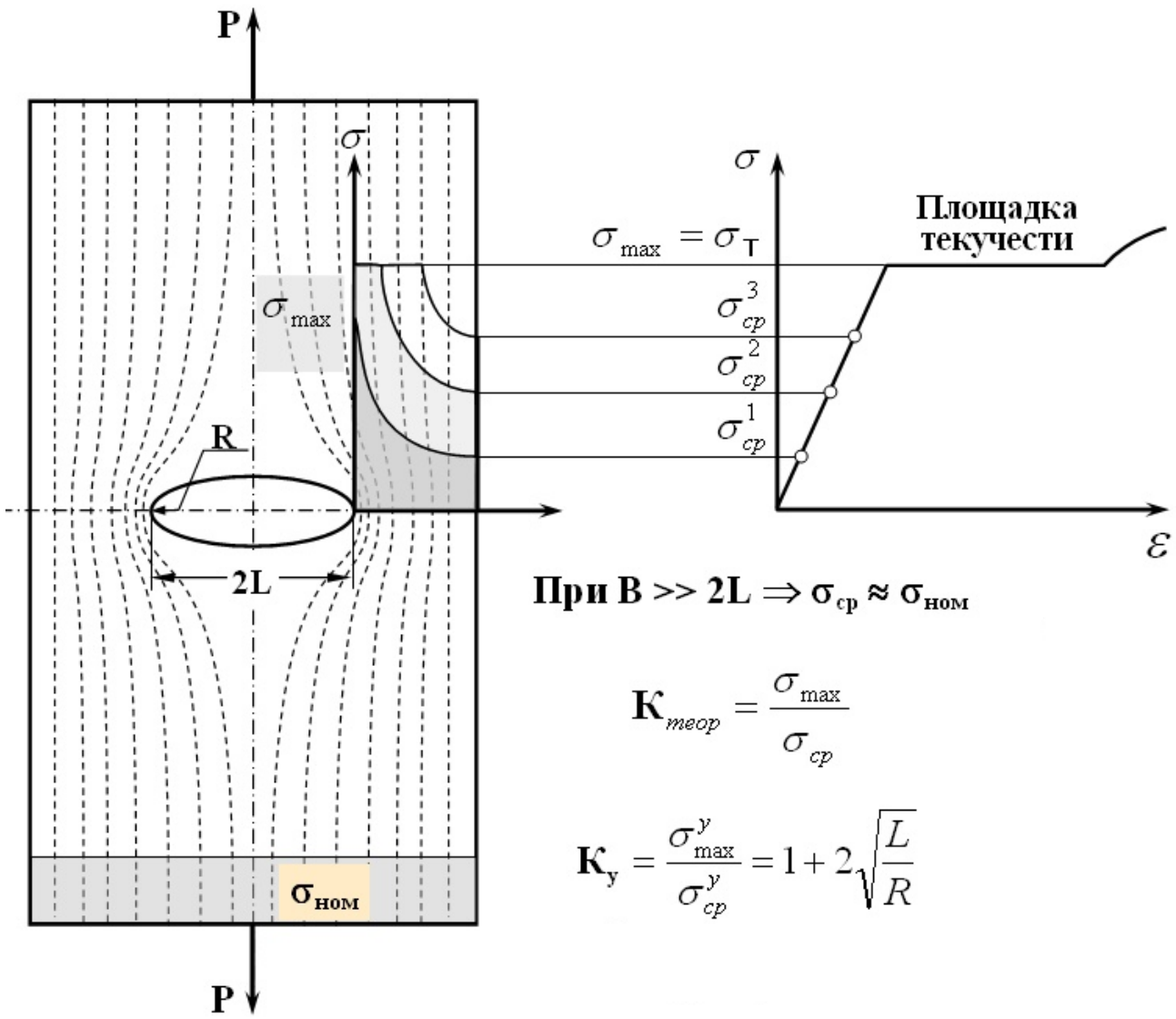
$$\alpha_\sigma = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma}$$

$$K_{теор} = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{ср}}$$

$$\sigma = (\sigma_0/2)\,[2 + d^2/4y^2 + (3/16)\,d^4/y^4]$$

$$y = d/2 \quad \sigma = 3\sigma_0$$

Концентрация напряжений



При B >> 2L ⇒ $\sigma_{ср} \approx \sigma_{ном}$

$$K_{теор} = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{ср}}$$

$$K_y = \frac{\sigma^y_{max}}{\sigma^y_{ср}} = 1 + 2\sqrt{\frac{L}{R}}$$

Методы оценки напряжений в сварных конструкциях

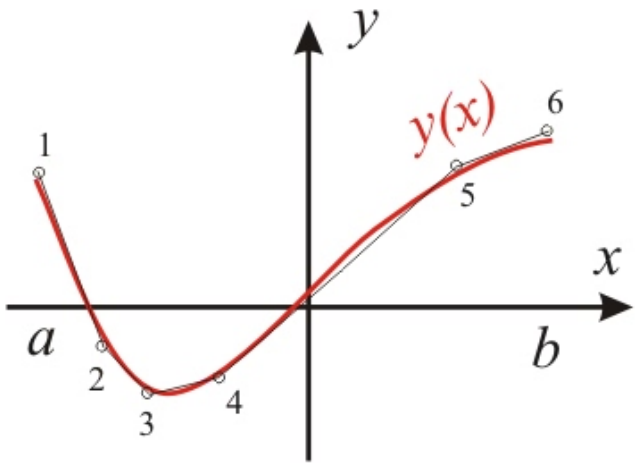
Расчетные методы

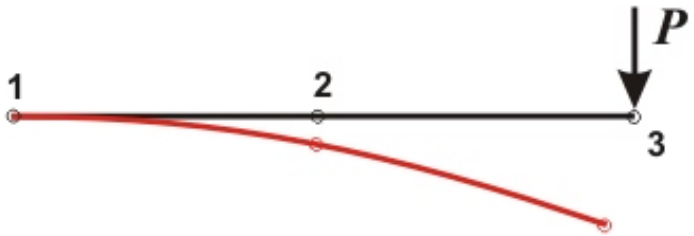
- Аналитические расчеты
- Метод конечных элементов (МКЭ)

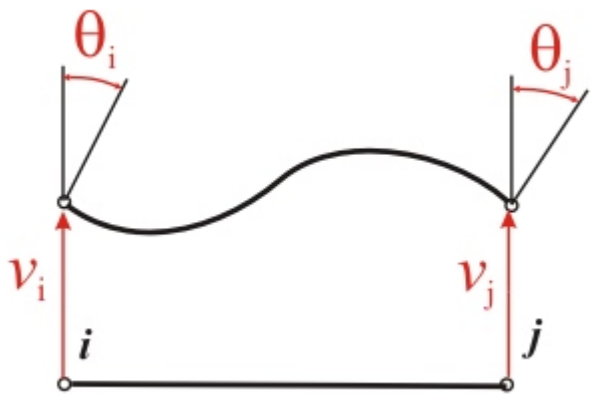
Экспериментальные методы

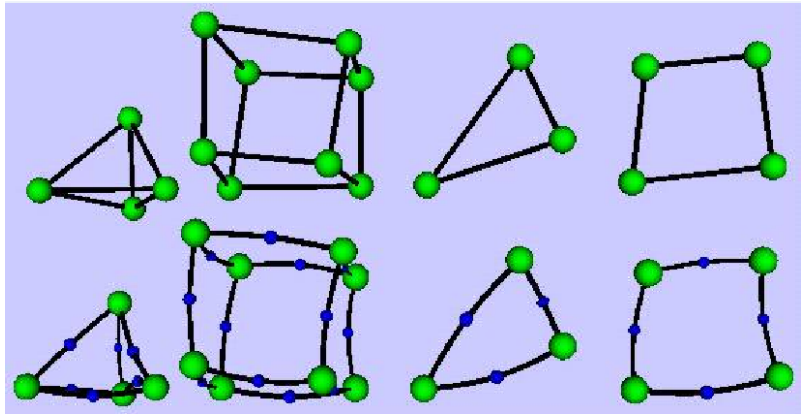
- Метод тензометрирования с использованием проволочных датчиков сопротивления
- Метод тензометрирования с использованием рычажных тензометров
- Метод бесконтактной акустической тензометрии
- Поляризационно-оптический метод
- Метод хрупких тензочувствительных покрытий

Конечноэлементные модели







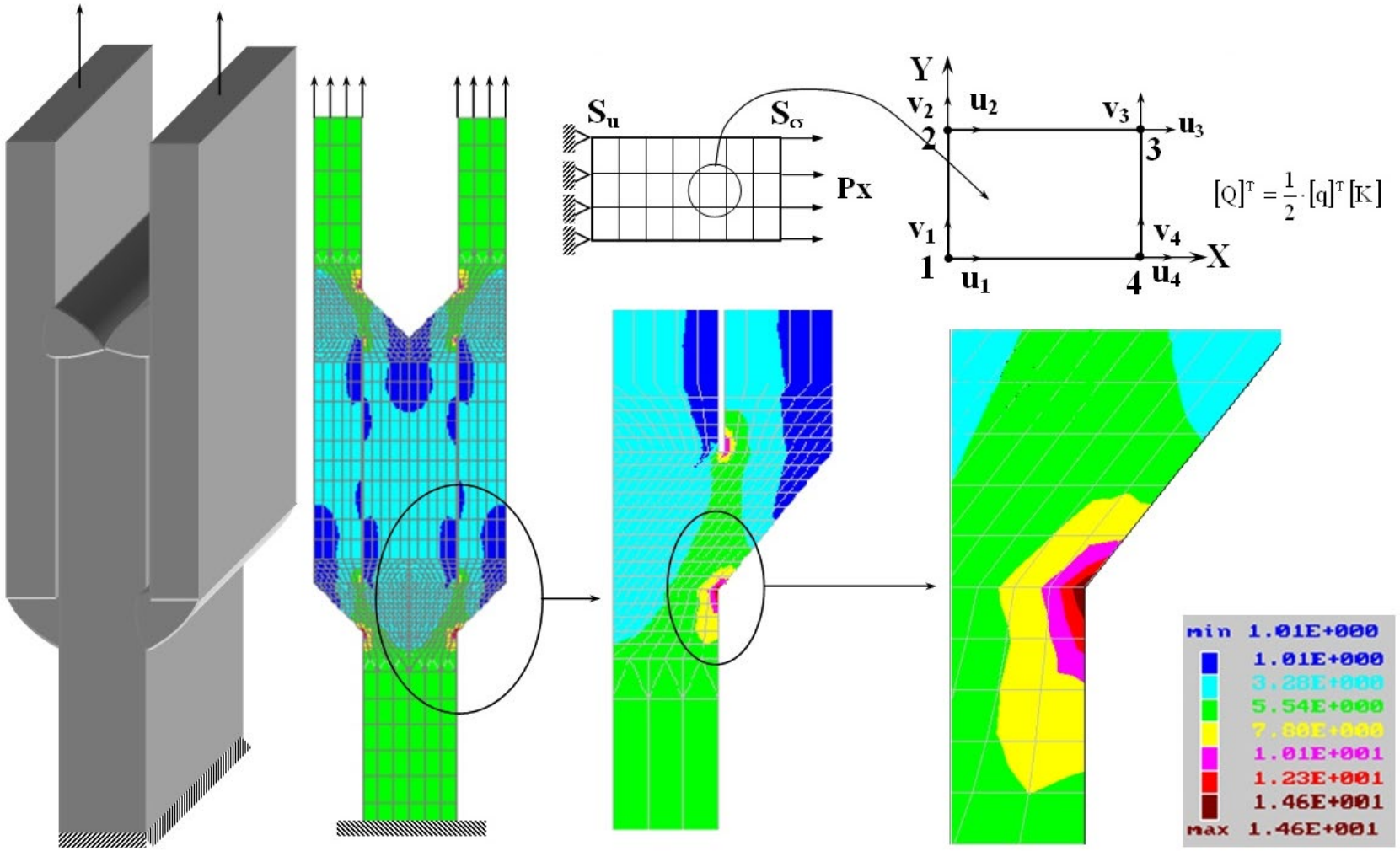


$$v = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 \qquad \theta = \frac{dv}{dx} = a_1 + 2a_2 x + 3a_3 x^2$$

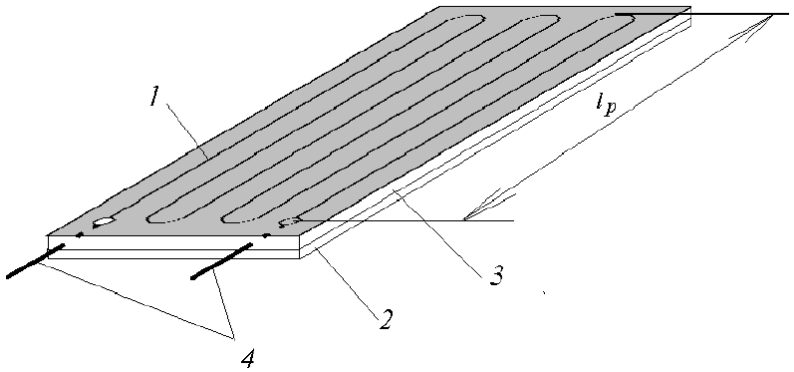
$$v_i = a_0, \qquad v_j = v_i + \theta_i x_j + a_2 x_j^2 + a_3 x_j^3,$$

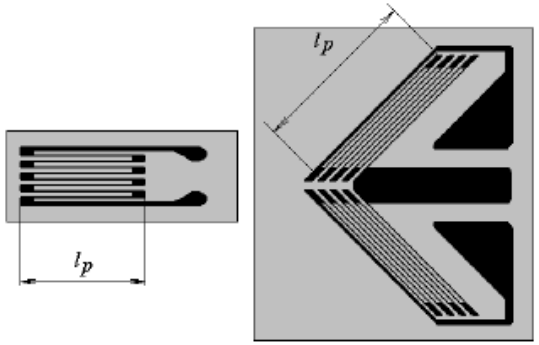
$$\theta_i = a_1. \qquad \theta_j = \theta_i + 2a_2 x_j + 3a_3 x_j^2.$$

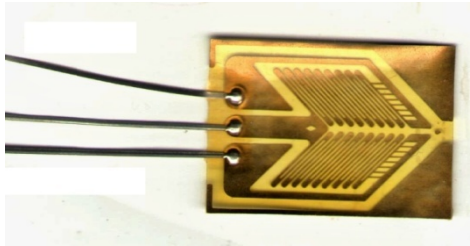
Метод конечных элементов (МКЭ)

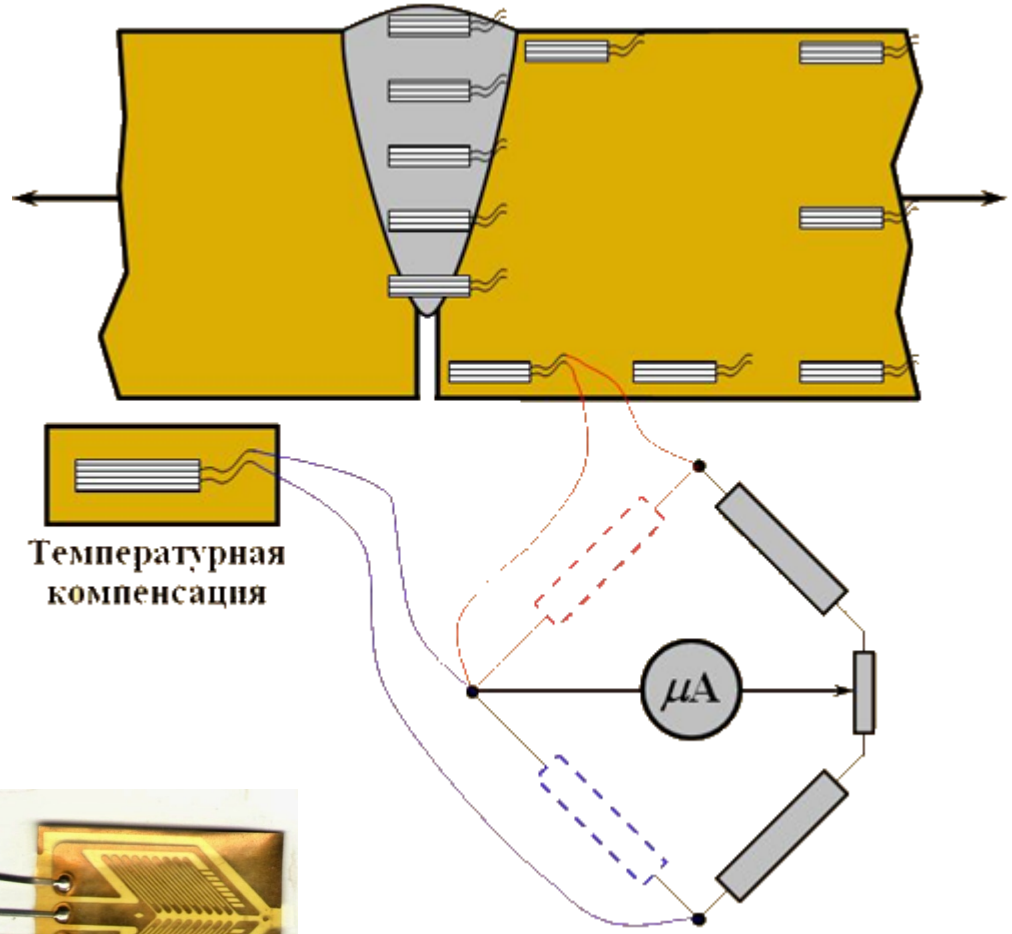


Определение деформаций и напряжений с помощью проволочных датчиков сопротивления

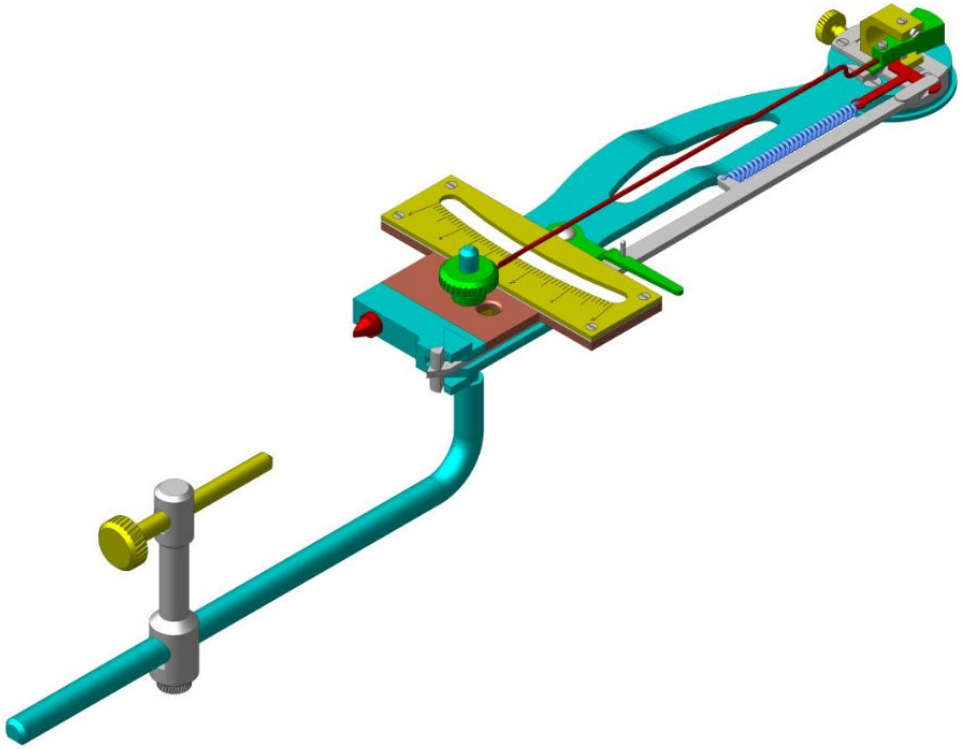




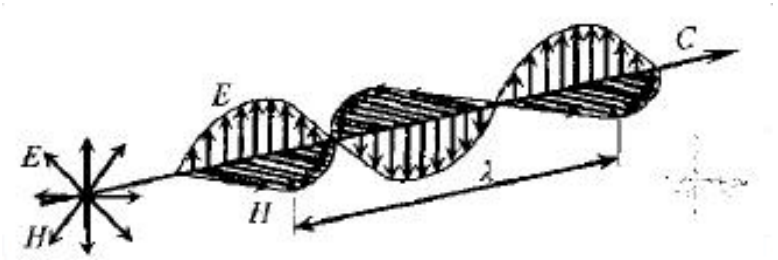


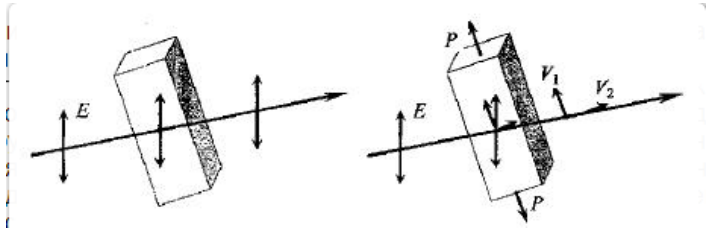


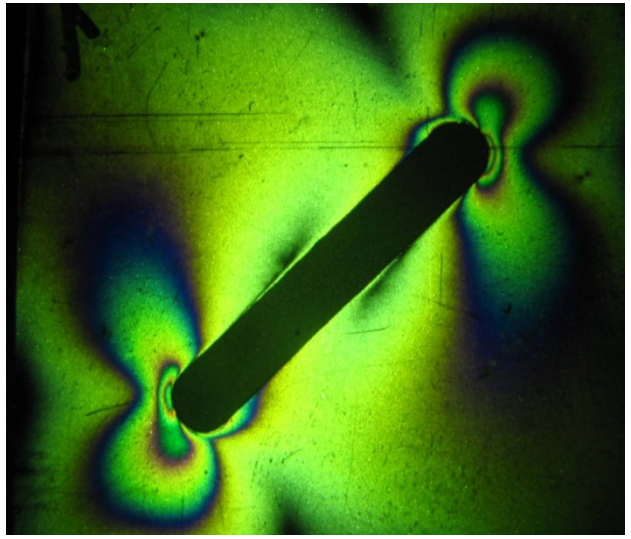
Рычажный тензометр Гугенбергера



Поляризационно-оптический метод исследования деформаций и напряжений



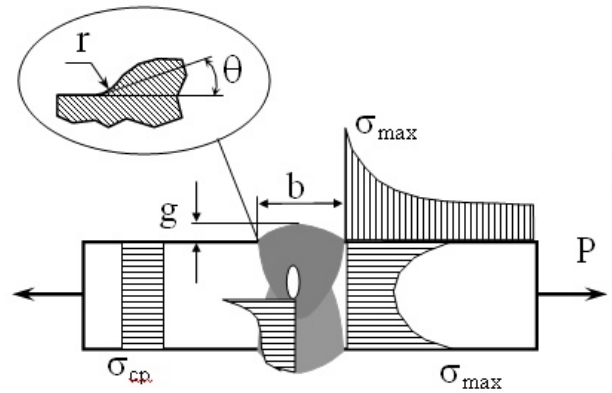




Основные причины концентрации напряжений в сварных соединениях:

1. Геометрия сечения сварного шва.
2. Дефекты сварного шва.
3. Конструктивное оформление сварных узлов

Концентрация напряжений в стыковых сварных соединениях



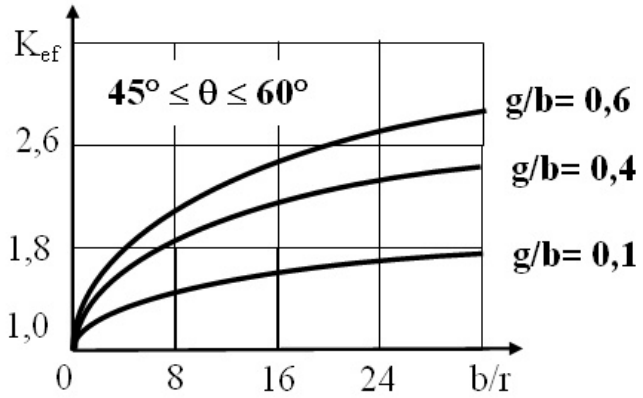
$$\sigma_{cp} = \frac{P}{F}; \quad K_{ef} = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{cp}}$$

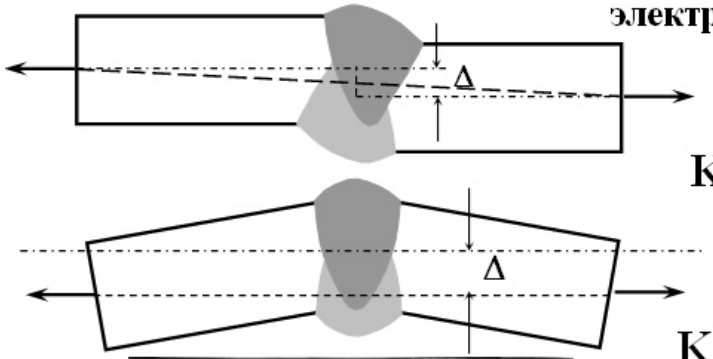
$$K_{ef} = f\left(\frac{g}{b}; \frac{g}{s}; \frac{b}{r}; \theta\right)$$

Обычно

K_{ef} = 1,3…2,0

(способ сварки, марка электрода, состав флюса)

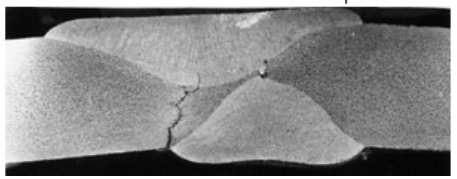


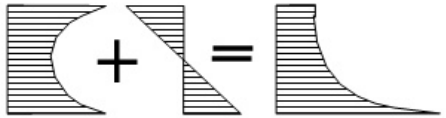


$$K_{ec} = \frac{\sigma_p + \sigma_m}{\sigma_p} = 1 + 3\frac{\Delta}{s}$$

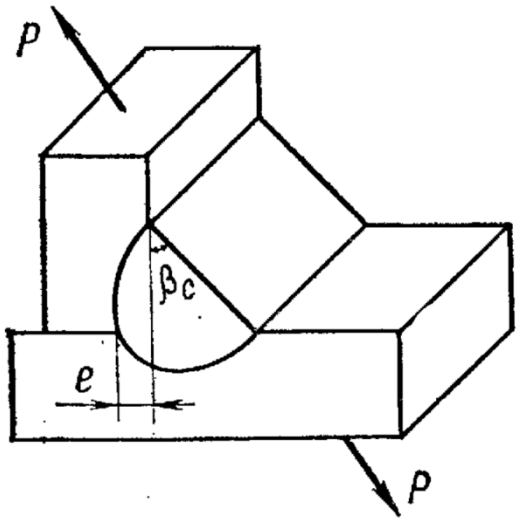
C<1,0

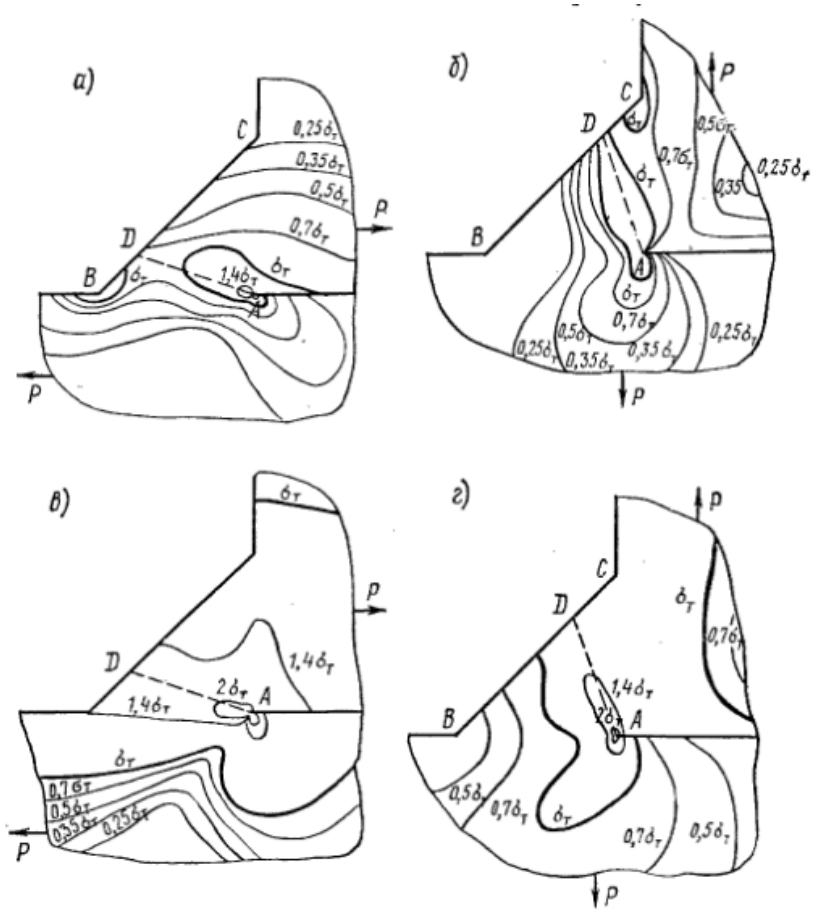
$$K_{ey} = \frac{\sigma_p + \sigma_m}{\sigma_p} = 1 + 6C\frac{\Delta}{s}$$



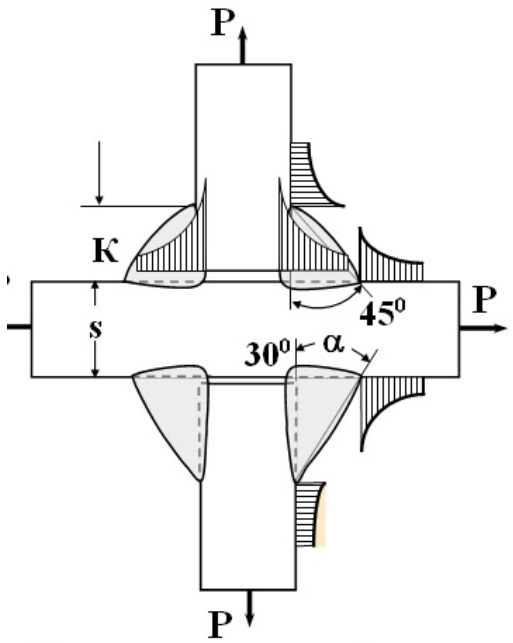


Распределение напряжений в сварных соединениях с угловыми лобовыми швами





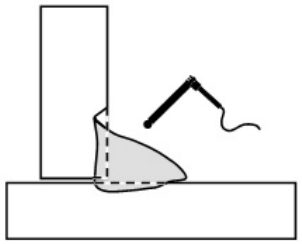
Распределение напряжений в сварных соединениях с угловыми лобовыми швами



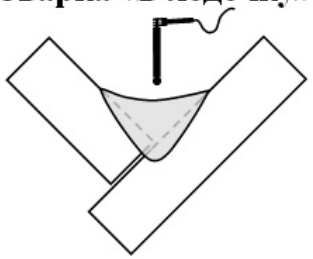
При $0{,}02 < r/s < 0{,}5$; $0{,}5 < K/s < 1{,}2$; $30^0 < \alpha < 80^0$

$$K_{ef} = 1 + \sqrt{\frac{2K/s}{(1+2K/s)^2 + 1{,}6}\, s/r} \quad \sin\alpha$$

Сварка «в угол»



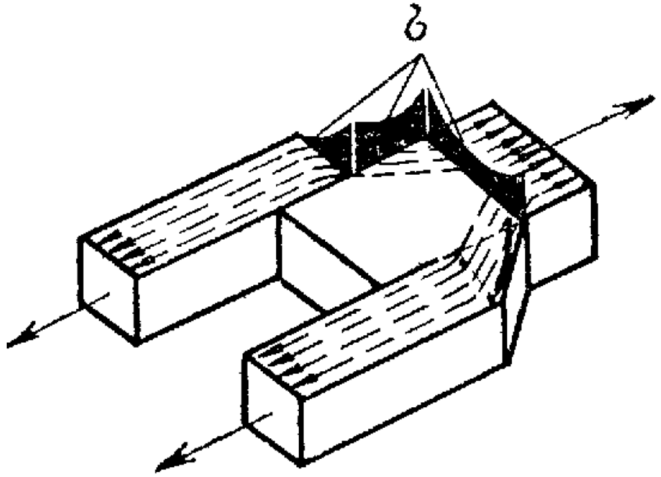
Сварка «в лодочку»

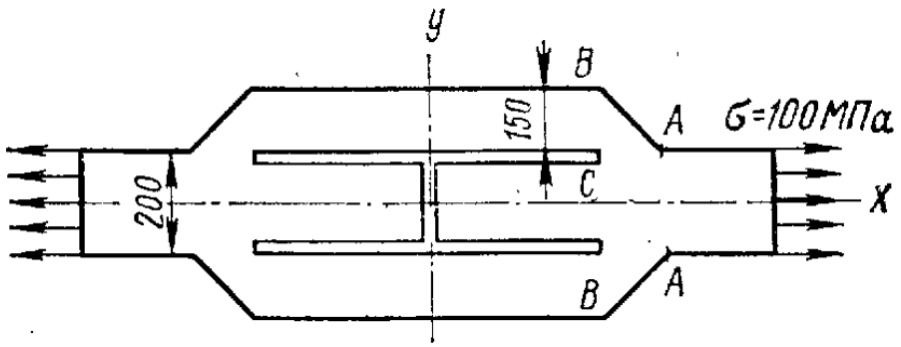


На величину Ке ВЛИЯЮТ:

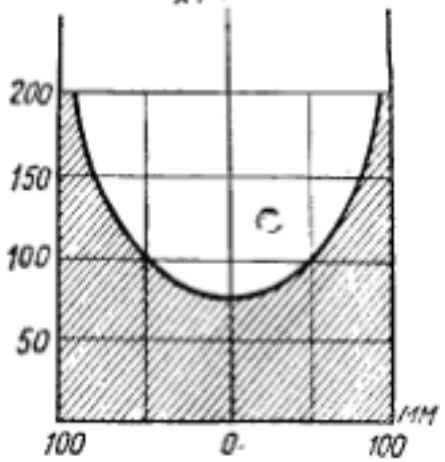
- Положение шва при сварке;
- способ сварки;
- марка электрода, проволоки, флюса;
- наличие подрезов;
- параметры режима сварки.

Распределение напряжений в нахлесточных сварных соединениях

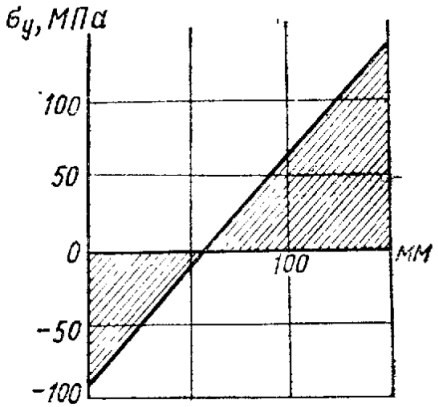




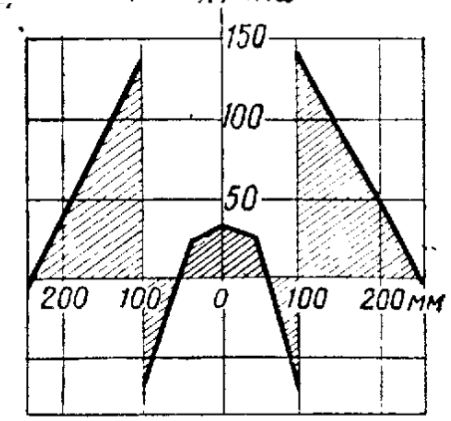
(сечение A — A)



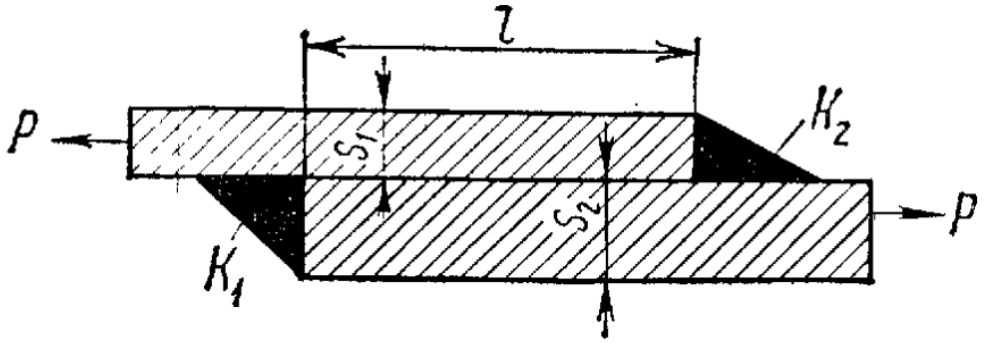
(сечение C — A)



(сечение B — B)

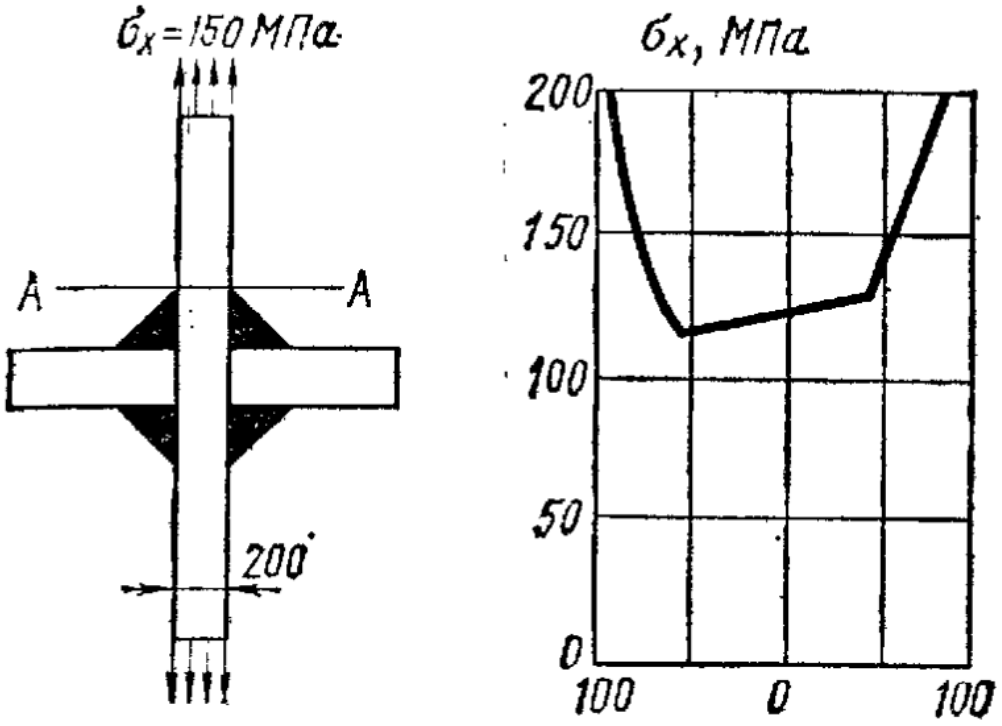


Распределение напряжений в нахлесточных соединениях

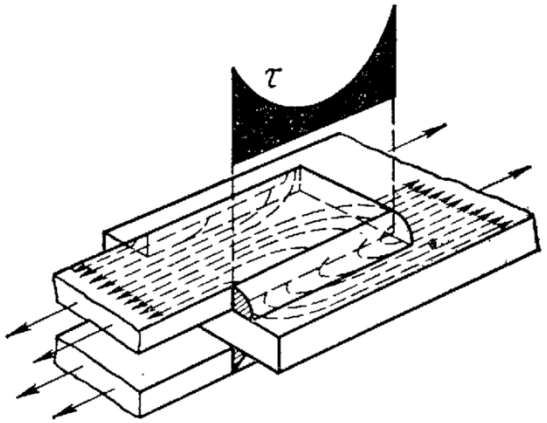


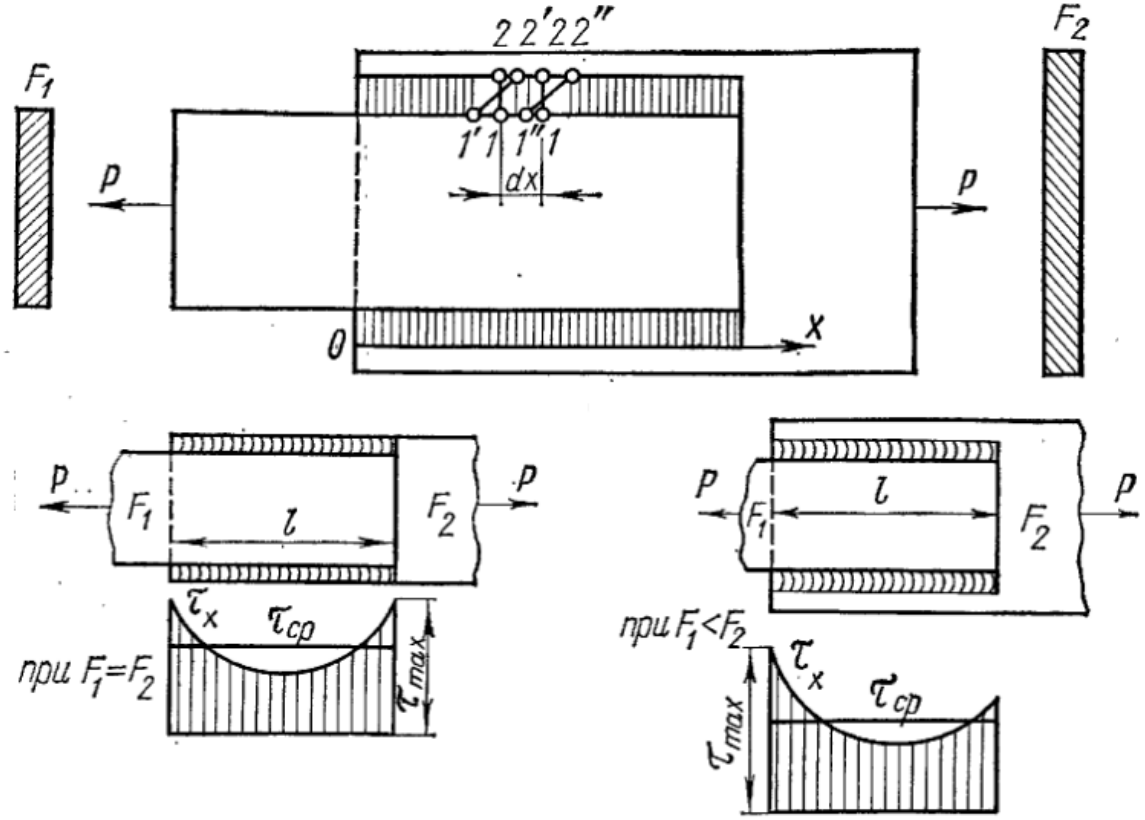
$$P_1/P_2 = 1 + [(s_2 - s_1)/s_1] \cdot 0{,}66l/(0{,}66l + 2s_2)$$

Распределение напряжений в тавровом сварном соединении

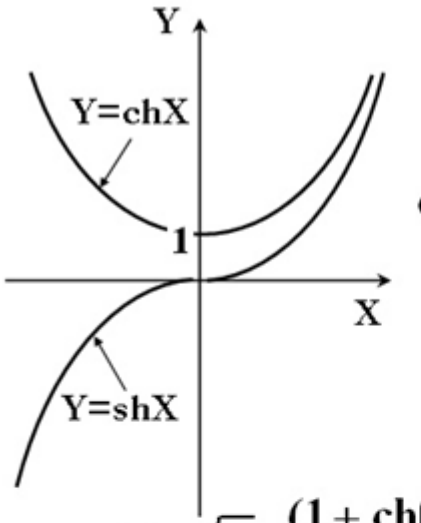


Распределений напряжений в соединениях с фланговыми швами





Концентрация напряжений во фланговых швах



При $F_2 = F_1$

$$q = \frac{\beta P\left[ch\beta X + ch\beta(L - X)\right]}{4sh\beta L}$$

При $F_2 = \varphi F_1$

$$q = \frac{\beta P\left[ch\beta X + \varphi ch\beta(L - X)\right]}{2(1+\varphi)sh\beta L}$$

При X=0; X=L – $q = q_{max}$

$$q_{max} = \frac{\beta P}{4}\frac{(1 + ch\beta L)}{sh\beta L}$$

$$q_{cp} = \frac{P}{2L}$$

$$q_{max} = \frac{\beta P}{2}\frac{(1 + \varphi ch\beta L)}{(1+\varphi)sh\beta L}$$

При $L >> \sqrt{F}$ $\frac{(1 + ch\beta L)}{sh\beta L} \approx 1$; $q_{max} = \frac{\beta P}{4}$

При $F_2 >> F_1$ $\frac{(1 + \varphi ch\beta L)}{(1+\varphi)sh\beta L} \approx 1$; $q_{max} = \frac{\beta P}{2}$

При $F_1 = F_2 \Rightarrow K_q = \frac{q_{max}}{q_{cp}} = \frac{\beta L}{2}$

При $F_2 >> F_1 \Rightarrow K_q = \frac{q_{max}}{q_{cp}} = \beta L$

Условие равнопрочности

$$[\sigma]F_1 = 2[\tau]0{,}7KL$$

$$[\tau] = 0{,}6[\sigma];\ F_1 = 0{,}84KL$$

$$\beta = \sqrt{\frac{2G(F_1 + F_2)}{EF_1F_2}}\quad G = \frac{E}{2(1-\mu)};\quad \beta = 1{,}26\sqrt{\frac{1}{F}}$$

$$K_q = \frac{\beta L}{2} = \frac{0{,}63L}{\sqrt{F}} = 0{,}7\sqrt{\frac{L}{K}}$$

Рекомендуют:
$L < (50\ldots80)K$

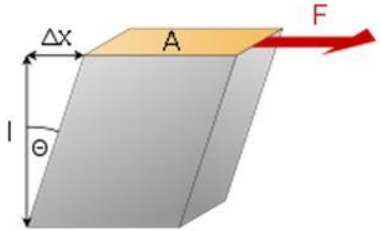
AWS D1.1. Рекомендует – $L < 100$ K
$L_{эфф} = \eta L$; $(\eta = 1.2 - 0.002(L/K)) \le 1.0$

Модуль сдвига **G** и коэффициент Пуассона **μ**

$$\mathrm{tg}\,\theta = \frac{a}{b} = \frac{\Delta x}{l} = \frac{1}{G}\sigma = \frac{1}{G}\frac{F}{S}$$

Модуль сдвига

$$G = 1 Па$$



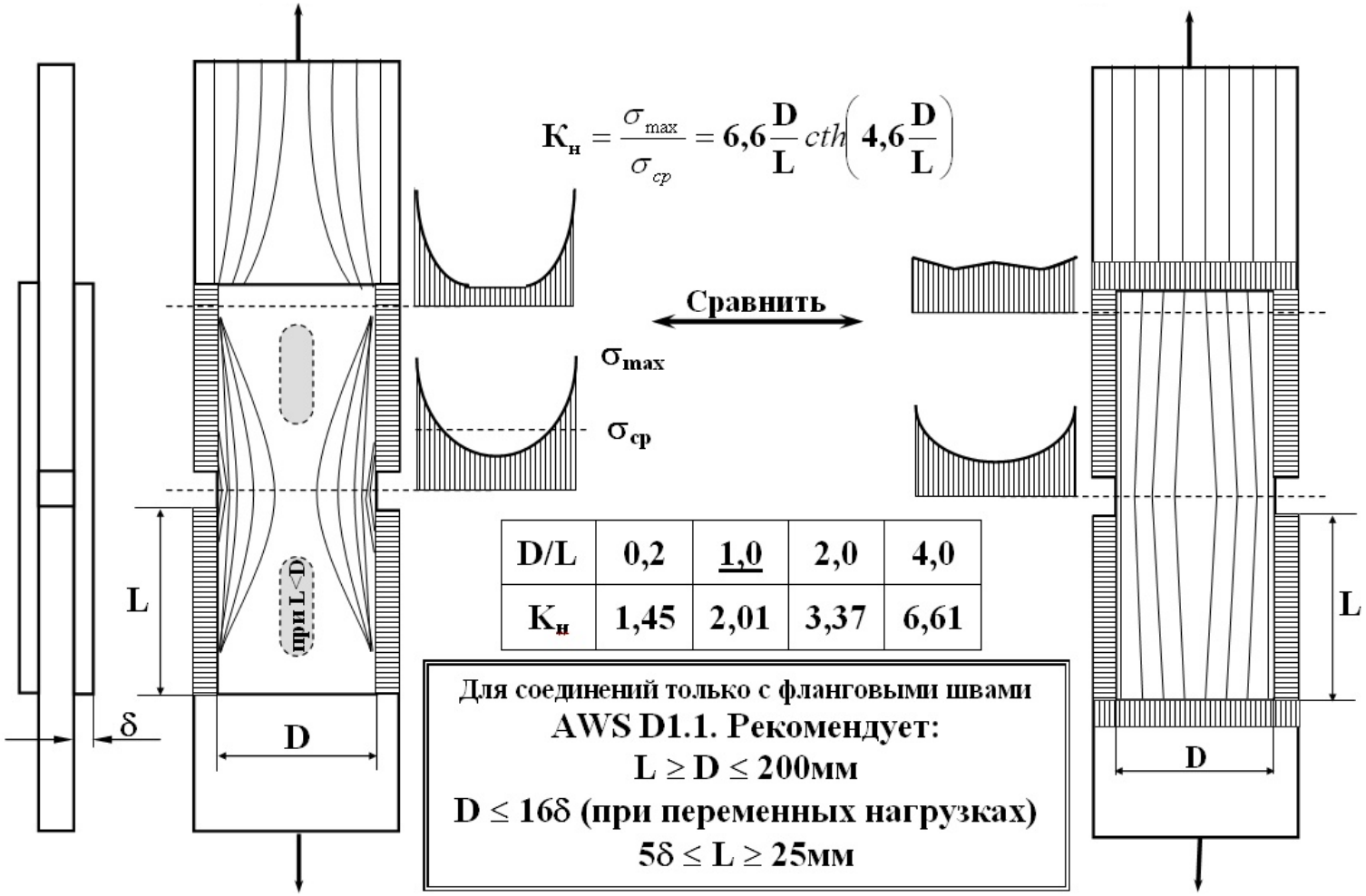
$$G = \frac{E}{2(1+\mu)}$$

$$\mu = \frac{\varepsilon_{попер}}{\varepsilon_{прод}}$$

$G_{ст}$ = 80 ГПа

$0 < \mu < 0{,}5$ для стали 0,3

Распределение напряжений в нахлесточном соединении

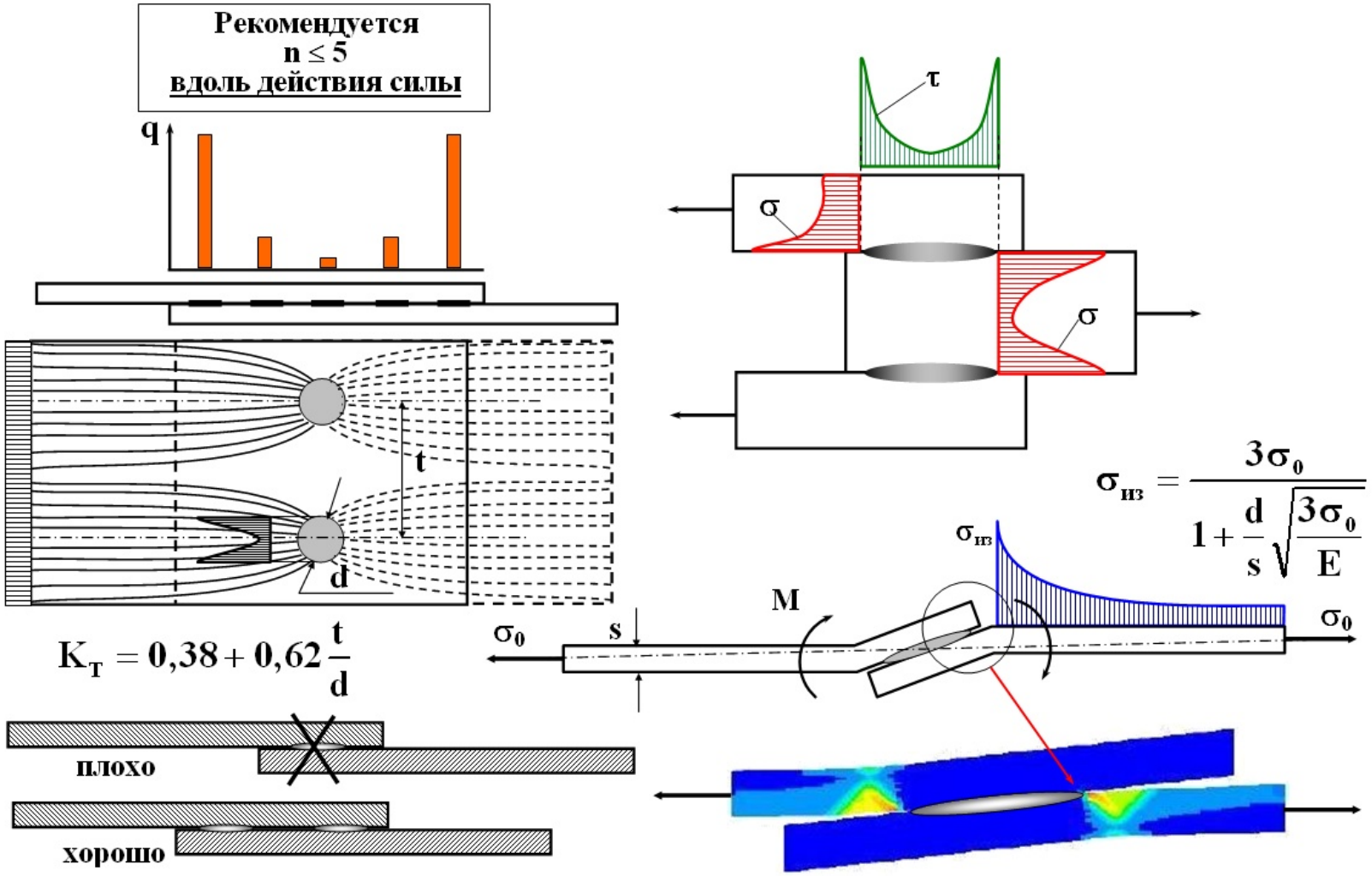


$$K_н = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{ср}} = 6{,}6\frac{D}{L}\,cth\left(4{,}6\frac{D}{L}\right)$$

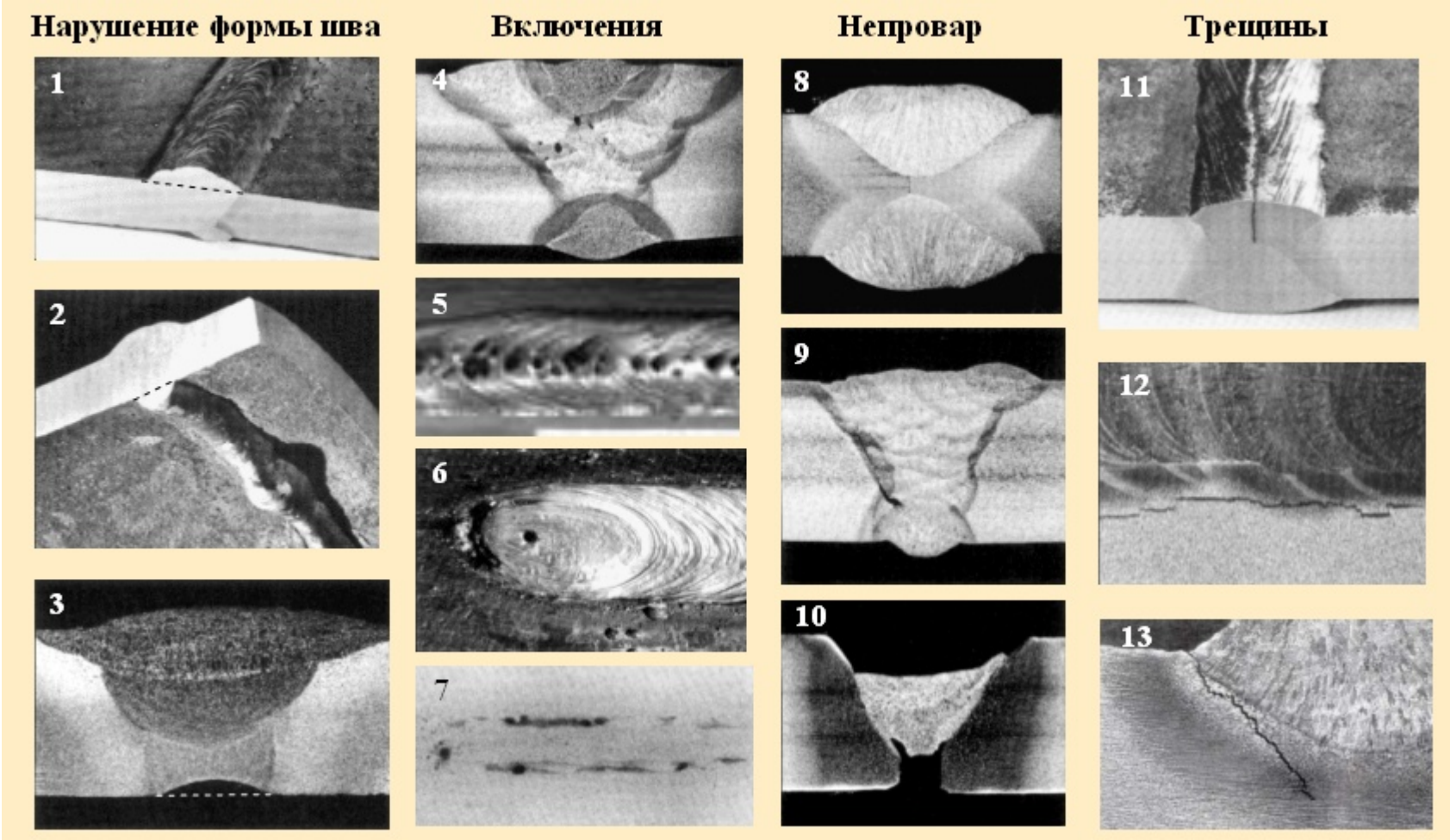
D/L	0,2	1,0	2,0	4,0
$K_н$	1,45	2,01	3,37	6,61

Для соединений только с фланговыми швами
AWS D1.1. Рекомендует:
$L \geq D \leq 200$мм
$D \leq 16\delta$ (при переменных нагрузках)
$5\delta \leq L \geq 25$мм

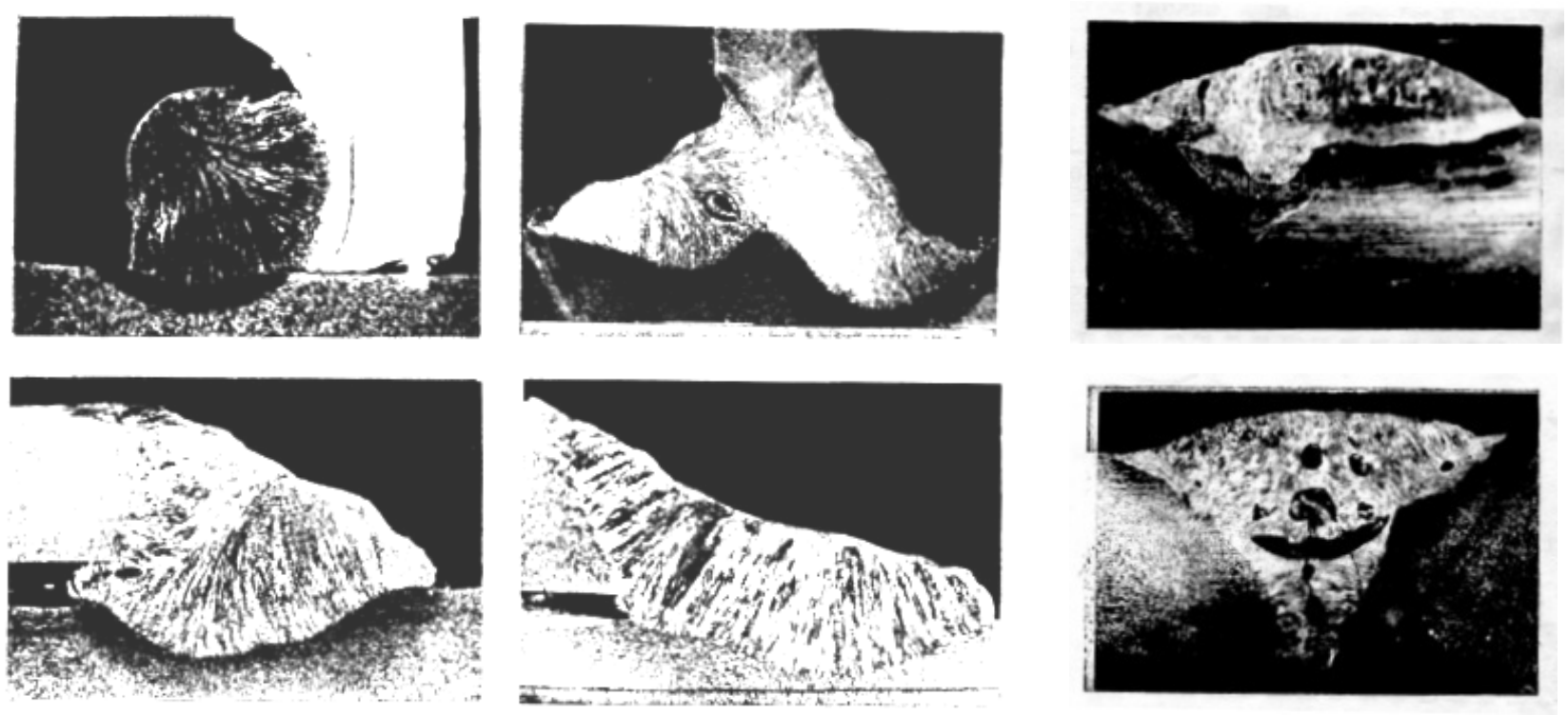
Распределение напряжений в точечных и шовных соединениях



Концентраторы напряжений обусловленные нарушением технологии сварки



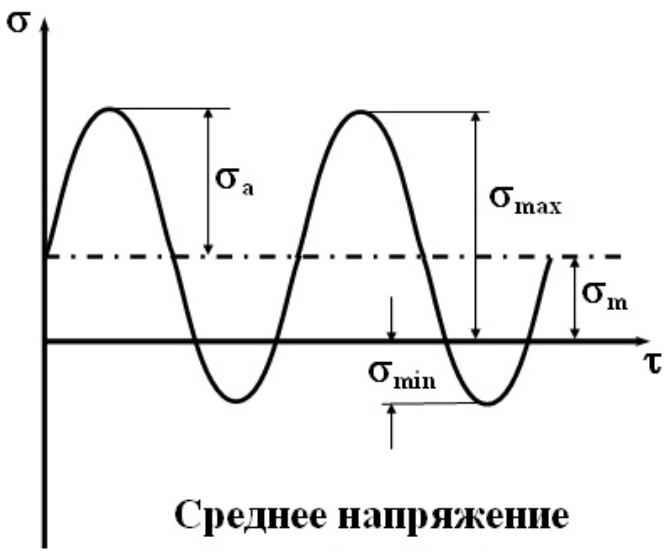
Концентраторы напряжений обусловленные нарушением технологии сварки



Усталость
сварных соединений

Характеристики переменных нагрузок

Параметры нагружения



Среднее напряжение

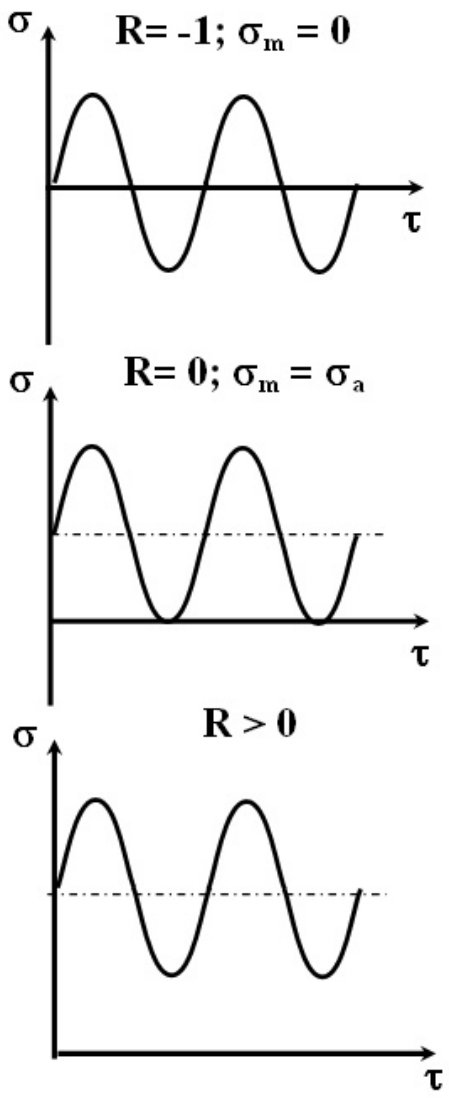
$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}$$

Амплитуда напряжений

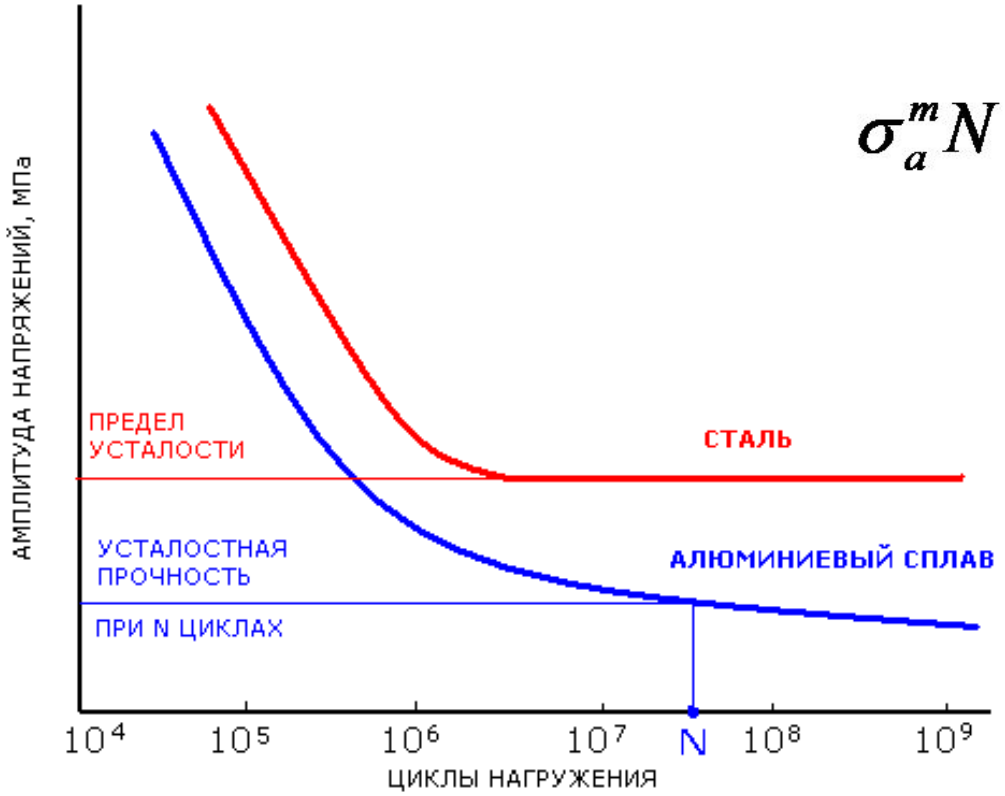
$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}$$

Характеристика цикла

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$$



Кривые усталости

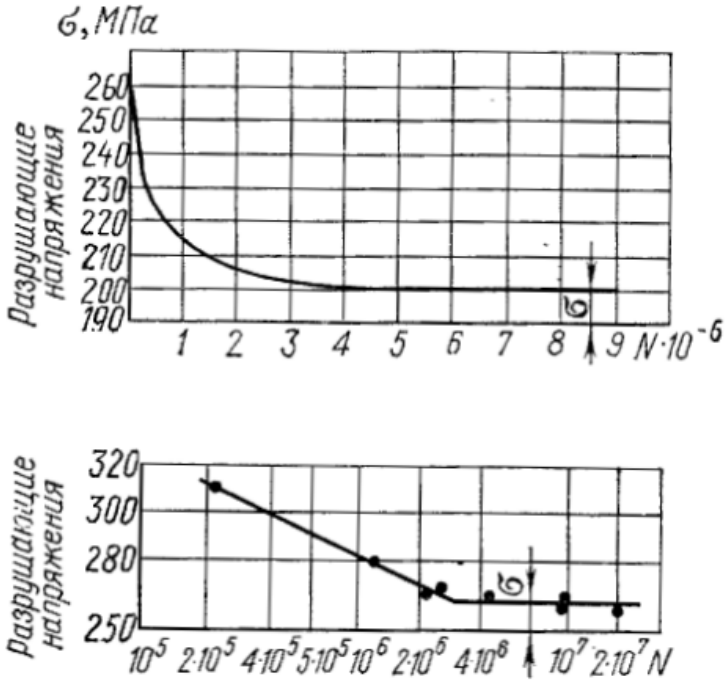


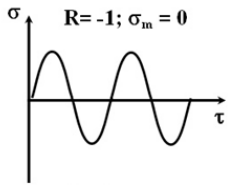
$$\sigma_a^m N = \sigma_{-1}^m N_0 = const$$

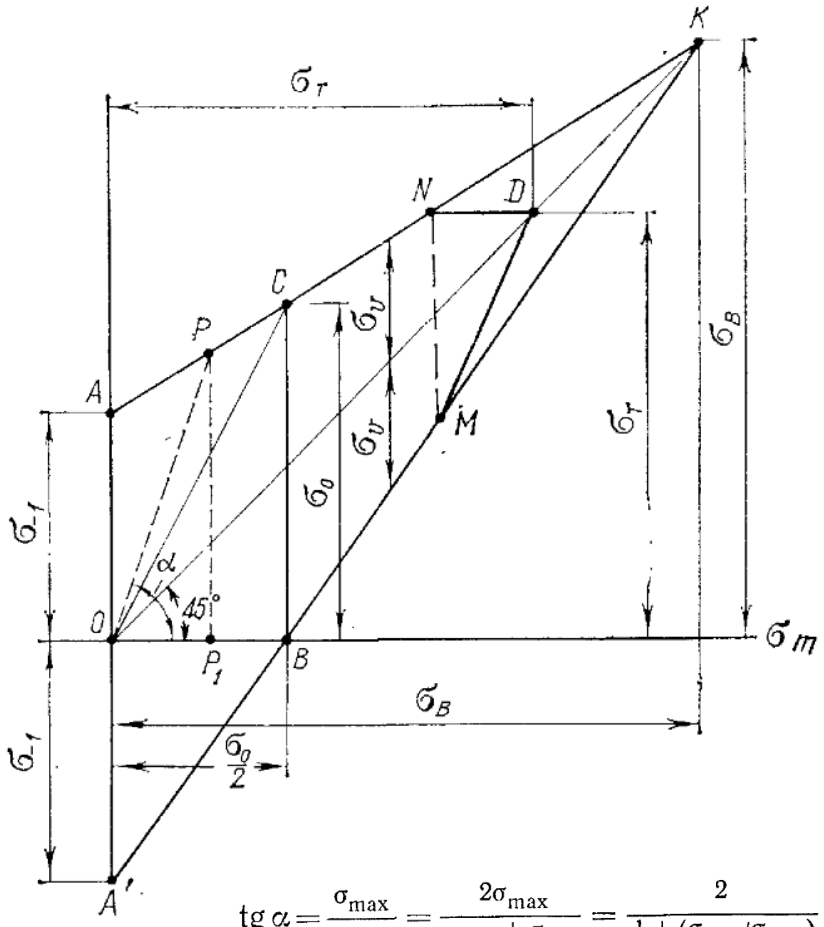
$$m = \frac{11...12}{K_{эф}}; \quad K_{эф} = \frac{\sigma_R^{ом}}{\sigma_R^{св}};$$

$$\sigma_a^{огр} = \sigma_R \sqrt[m]{\frac{2 \cdot 10^6}{N}};$$

Диаграмма усталости

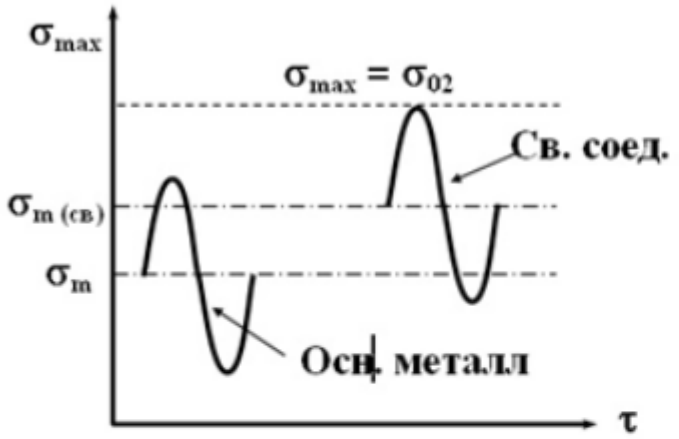




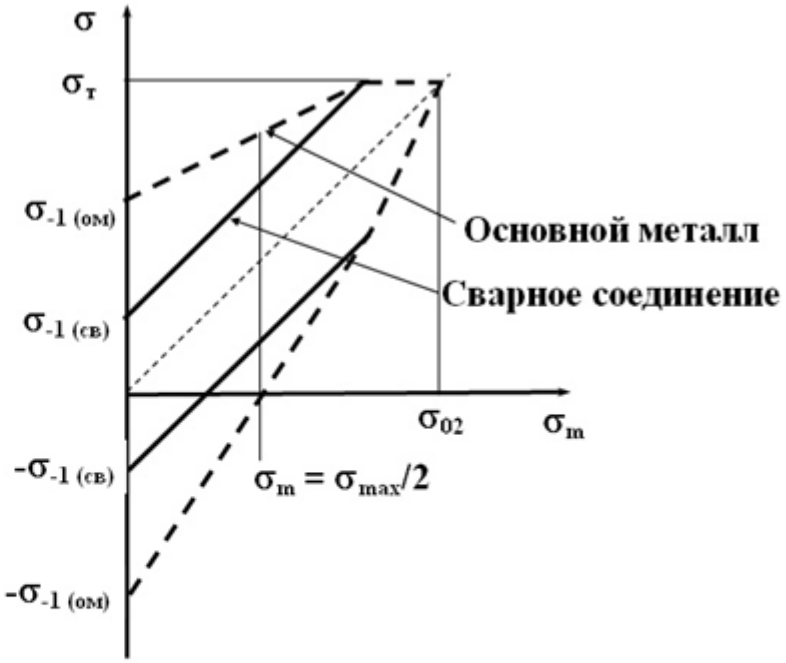


$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_m} = \frac{2\sigma_{max}}{\sigma_{max}+\sigma_{min}} = \frac{2}{1+(\sigma_{min}/\sigma_{max})} = \frac{2}{1+r}$$

Особенности нагружения сварных соединений при переменных нагрузках



При $\sigma_{max} + \sigma_{ост} > \sigma_{02}$; $\sigma_{m\,(св)} = \sigma_{02} - \sigma_a$



Влияние асимметрии цикла

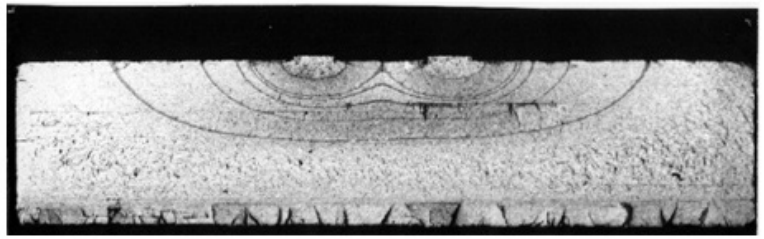
Основной металл

$$\sigma_{max} = \sigma_{-1} + (1-\phi)\sigma_m;$$

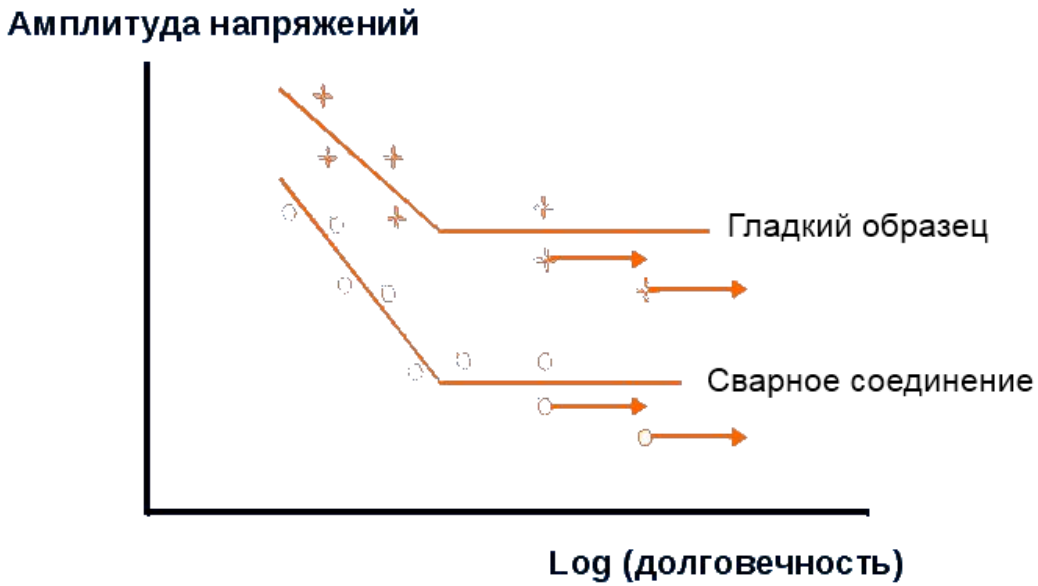
$$\phi = 0{,}1 \ldots 0{,}3$$

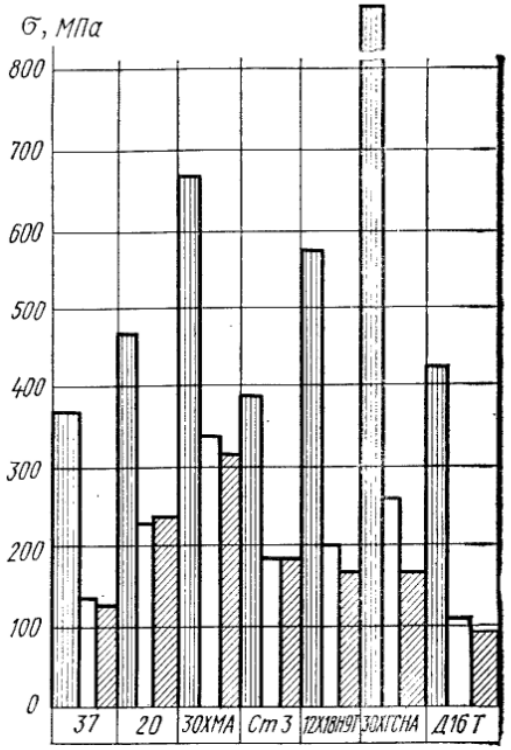
Сварное соединение

$$\sigma_{max} = \frac{2\sigma_{-1}}{1-R}$$



Эффективный коэффициент концентрации напряжений

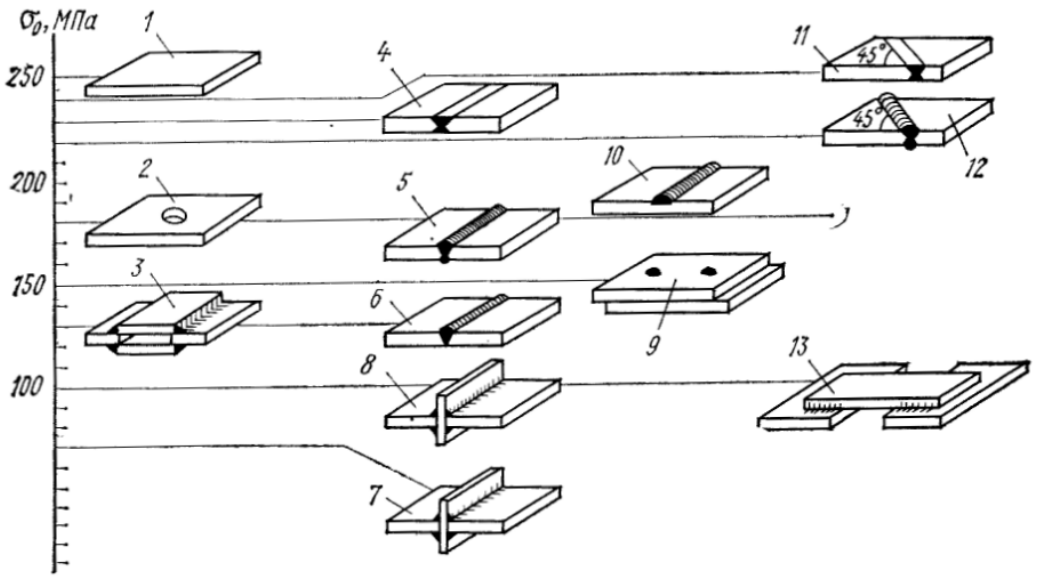




$$K_{эф} = \frac{\sigma_R^{ом}}{\sigma_R^{св}}$$

$$\lg(\sigma_{-1}\alpha_\sigma - 8{,}9) = 1{,}4 - 2{,}3 \lg\{\pi d/[(2/\rho) + (2/d)]\}$$

Значения $K_{эф}$ сварных соединений



Схемы видов сварных соединений		$K_э$	
Вид в плане	Разрезы	Ст3	15ХСНД
Обработано	Стыковое соединение с обработкой стыкового шва	1,0	1,0
	Технологическим путем осуществленный плавный переход от шва к основному металлу	1,2	1,33
	без механической обработки обычного качества	1,4	1,8
	Ручная сварка	1,6	2,2
	Обрыв стенки	2,0	2,8
	b = 2a	2,3	3,2
		2,5	3,5
		3,4	4,4
	Обрыв поясов	4,0	4,9

Расчет сварных соединений на усталость

$$[\sigma]_R^{св} = \frac{\sigma_R^{св}}{n}$$

$$K_{эф} = \frac{\sigma_R^{ом}}{\sigma_R^{св}}$$

Расчет сварных соединений на усталость по СНиП

Группы элементов и соединений при расчете на усталость по СНиПу. Эффективные коэффициенты концентрации напряжений $K_э$ по нормам Минтяжмаша для краностроения

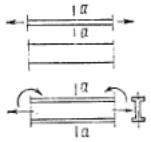
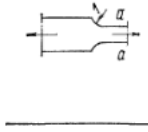
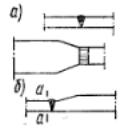
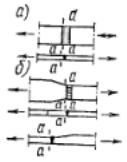
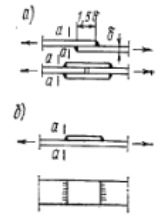
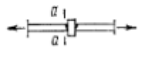
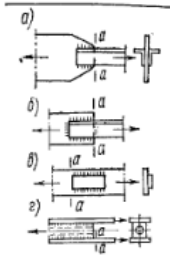
Схема соединения и расположение расчетного сечения а — а	Характеристика сечения	Группа элемента или соединения	$K_э$
	Основной металл с необработанной прокатной поверхностью и с прокатными, обрезанными или обработанными механическим путем кромками в сечениях вне сварных швов, заклепок и болтов	1	1,0/1,0
	То же, но с кромками, обрезанными газовой резкой:		
	машинной	2	1,2/1,2
	ручной	4	1,8/1,4
	Основной металл с необработанной прокатной поверхностью и обработанными механическим путем кромками при разной ширине в радиусе перехода:		
	$r = 200$ мм	1	1,0/1,0
	$r = 10$ мм	4	2,0/1,6
	Основной металл в месте перехода к необработанному стыковому шву с усилением, имеющим достаточно плавный переход:		
	а) при стыковании листов одинаковой толщины и ширины	4	1,8/1,4
	б) при стыковании листов разной ширины или листов разной толщины с плавным переходом	5	2,5/2,0
	Основной металл в месте перехода к стыковому шву, обработанному в этом месте абразивным кругом или специальной фрезой:		
	а) при стыковании листов одинаковой толщины и ширины	2	—
	б) при стыковании листов разной толщины или ширины	3	—

Схема соединения и расположение расчетного сечения а — а	Характеристика сечения	Группа элемента или соединения	$K_э$
	Основной металл в месте перехода к поперечному (лобовому) угловому шву:		
	а) при передаче усилия через швы без механической обработки при отношении катетов 1 : 1,5 (при направлении большего катета вдоль усилия)	7	3,2/2,5
	то же, при механической обработке перехода от шва к основному металлу	4	—
	б) без механической обработки при передаче усилия через основной металл	6	1,6/1,2
	то же, при зачистке зоны перехода от шва к основному металлу	4	—
	Основной металл в соединениях с фланцами при плавном переходе шва к основному металлу:		
	с глубоким проваром присоединения	7	—
	то же, с механической обработкой перехода от сварного шва к основному металлу	4	—
	Основной металл в соединениях с фланговыми швами, работающими на срез от осевой силы, в местах перехода от элемента к концам фланговых швов независимо от обработки:		
	а) с двумя фланговыми швами	8	4,0/3,2
	б) с фланговыми и лобовыми швами	8	—
	в) при передаче усилия через основной металл	8	2,0/1,6
	г) щеки анкеров для крепления стальных канатов	8	—
	Основной металл вблизи диафрагм и ребер, приваренных угловыми швами к растянутым поясам балок и элементам ферм:		
	без механической обработки швов, но при наличии плавного перехода от швов к металлу при ручной и полуавтоматической сварке	4	1,6/1,2
	то же, при механической обработке швов	2	—

Пределы выносливости $[\sigma]_r$, МПа, для элементов конструкций из стали класса С 38/23 ($\sigma_в = 380$ МПа, $\sigma_т = 230$ МПа) **в зависимости от эффективного коэффициента концентрации напряжений $K_э$ и характеристики цикла r**

$K_э$	Сжатие									Растяжение								
	$\sigma_{0,4}$	$\sigma_{0,4}$	$\sigma_{0,2}$	σ_0	$\sigma_{-0,2}$	$\sigma_{-0,4}$	$\sigma_{-0,6}$	$\sigma_{-0,8}$	σ_{-1}	$\sigma_{-0,8}$	$\sigma_{-0,6}$	$\sigma_{-0,4}$	$\sigma_{-0,2}$	σ_0	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_{0,4}$	$\sigma_{0,6}$	$\sigma_{0,8}$
1	—	—230	—230	—230	—230	—208	—175	—151	134	145	159	175	196	222	230	230	230	230
1,2	—	—230	—230	—230	—208	—171	—145	—125	111	121	133	148	166	190	212	229	230	230
1,4	—	—230	—230	—222	—175	—145	—123	—107	95	104	115	128	145	166	186	212	230	230
1,6	—	—230	—230	—190	—151	—126	—107	—94	83	91	101	113	128	148	166	190	222	230
1,8	—	—230	—222	—166	—133	—111	—95	—83	74	81	90	101	115	133	150	173	203	230
2,0	—	—230	—183	—132	—103	—85	—71	—62	55	61	68	78	90	107	123	144	173	216
2,2	—	—230	—162	—117	—92	—76	—64	—55	49	55	62	70	82	97	112	131	159	200
2,5	—	—207	—137	—100	—79	—65	—55	—48	43	48	54	61	71	85	98	116	141	178
2,8	—	—177	—119	—88	—69	—57	—49	—42	38	42	47	54	63	76	88	104	127	162
3,2	—	—148	—101	—75	—59	—49	—42	—36	32	36	41	47	55	66	76	91	112	144
3,6	—228	—127	—87	—65	—52	—43	—37	—32	29	32	36	41	48	58	68	81	100	129
4,0	—196	—111	—77	—57	—46	—38	—33	—28	25	28	32	37	43	52	61	73	90	117

Примечание. За предел выносливости условно принято предельное напряжение при $N = 2 \cdot 10^6$ циклов нагружений, если $K_э < 2$, и при $N = 5 \cdot 10^6$, если $K_э \geqslant 2$.

Значение коэффициента ζ при числе циклов нагружения N

$K_э$	$N = 5 \cdot 10^4$					$N = 2 \cdot 10^5$					$N = 8 \cdot 10^5$					$N = 2 \cdot 10^6$				
	Характеристика цикла																			
	−1	−0,6	0	0,4	0,8	−1	−0,6	0	0,4	0,8	−1	−0,6	0	0,4	0,8	−1	−0,6	0	0,4	0,8
2,0	2,7	2,4	1,9	1,6	1,3	2,0	1,8	1,6	1,4	1,2	1,5	1,4	1,3	1,2	1,1	1,2	1,2	1,1	1,1	1,1
2,2	2,9	2,5	2,0	1,7	1,3	2,1	1,9	1,6	1,4	1,2	1,5	1,5	1,3	1,2	1,1	1,2	1,2	1,2	1,1	1,1
2,5	3,1	2,7	2,1	1,8	1,4	2,2	2,0	1,7	1,5	1,3	1,6	1,5	1,4	1,3	1,2	1,3	1,2	1,2	1,1	1,1
2,8	3,3	2,9	2,3	1,9	1,5	2,3	2,1	1,8	1,6	1,3	1,6	1,5	1,4	1,3	1,2	1,3	1,2	1,2	1,1	1,1
3,2	3,6	3,2	2,4	2,0	1,6	2,4	2,2	1,9	1,7	1,4	1,7	1,6	1,4	1,3	1,2	1,3	1,3	1,2	1,2	1,1
3,6	3,8	3,4	2,6	2,2	1,7	2,6	2,3	2,0	1,7	1,4	1,7	1,6	1,5	1,4	1,2	1,3	1,3	1,2	1,2	1,1
4,0	4,1	3,6	2,8	2,3	1,8	2,7	2,5	2,0	1,8	1,5	1,8	1,7	1,5	1,4	1,3	1,3	1,3	1,2	1,2	1,1

Стратегия обеспечения усталостной прочности

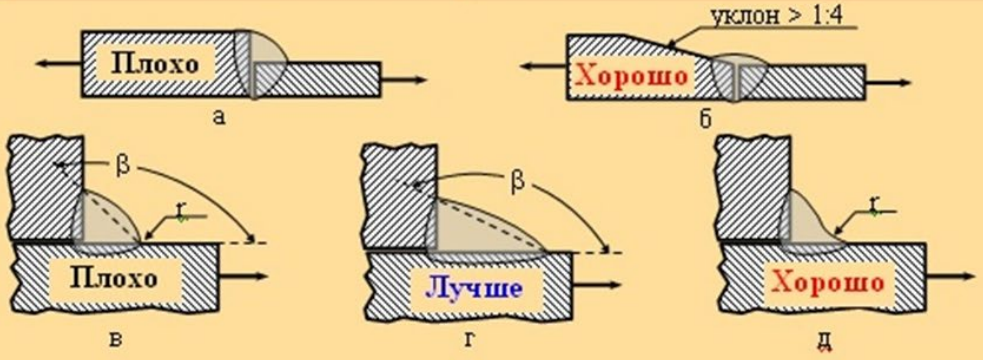
Хорошее проектирование – снижение концентрации напряжений; размещение швов в малонагруженных зонах конструкции

Хорошее качество сварки – хороший материал и подготовка к сварке; стабильная технология; высокая квалификация сварщиков

Применение технологий повышения прочности – в процессе сварки или после сварки (плавные переходы, сжимающие остаточные напряжения)

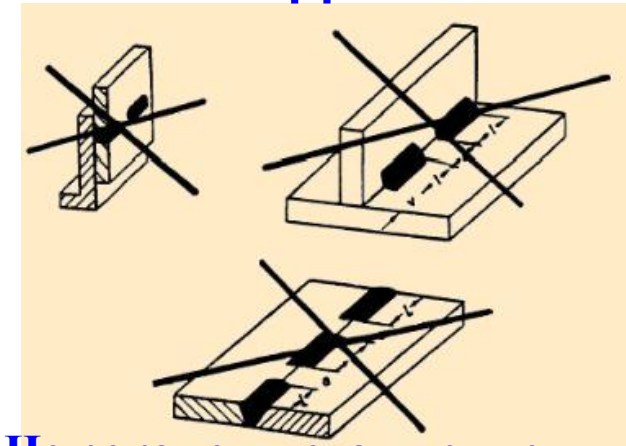
Рациональное проектирование сварных соединений, работающих при переменных нагрузках

- **Проектировать сварные соединения с полным проплавлением.**
- **Отдавать предпочтение стыковым соединениям пред нахлесточными, угловыми и тавровыми.**
- **Двухсторонние тавровые соединения предпочитать односторонним.**
- **Сварные соединения располагать симметрично по отношению линии действия силы.**
- **Избегать применения накладок на несущих элементах.**

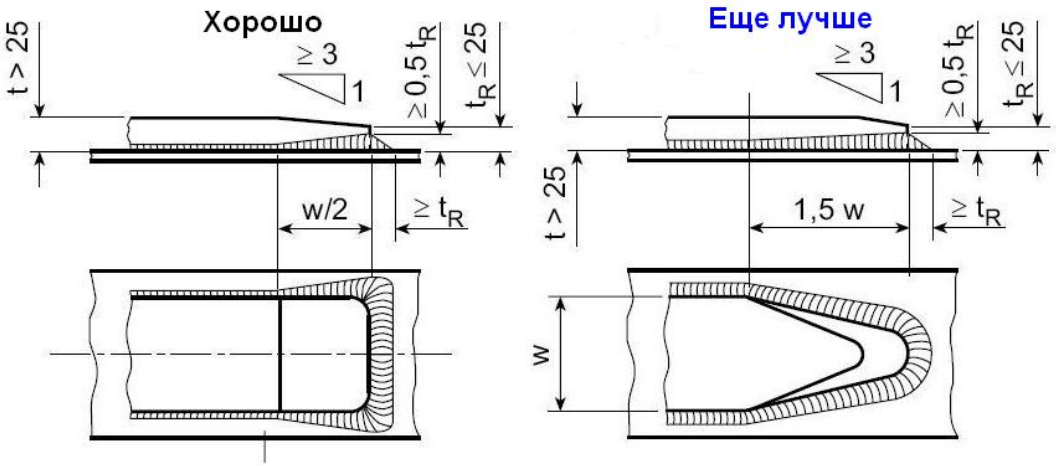


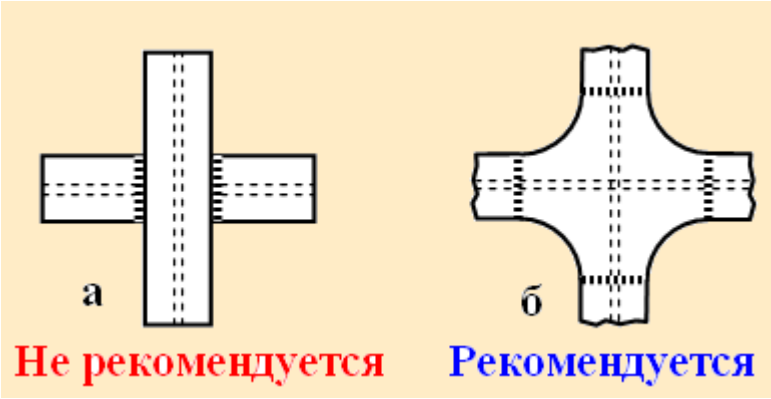
- **Детали, присоединяемые к несущим элементам, должны располагаться не ближе 10…15 мм от края этого элемента.**
- **Угловые швы не доводить до края детали на 10…15 мм, если это не противоречит другим требованиям.**
- **Не рекомендуется применять прерывистые швы.**
- **Запрещается присоединять к несущим элементам непредусмотренные проектом детали.**

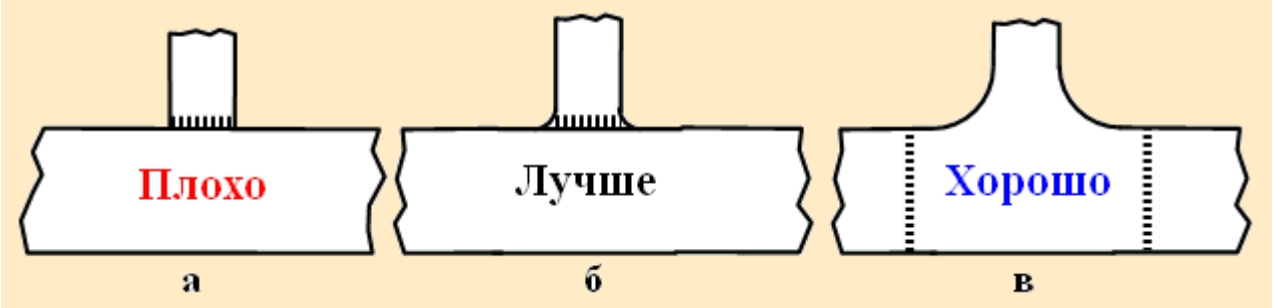
Повышение усталостной прочности сварных соединений на стадии проектирования



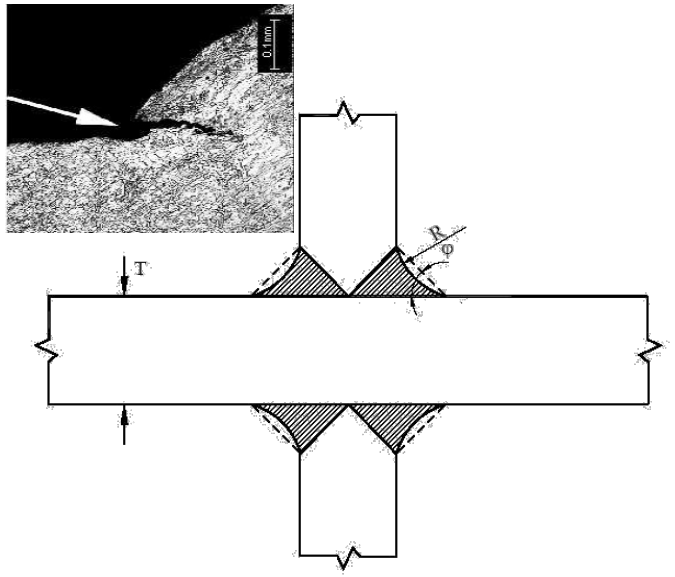
Не рекомендуется применять прерывистые швы



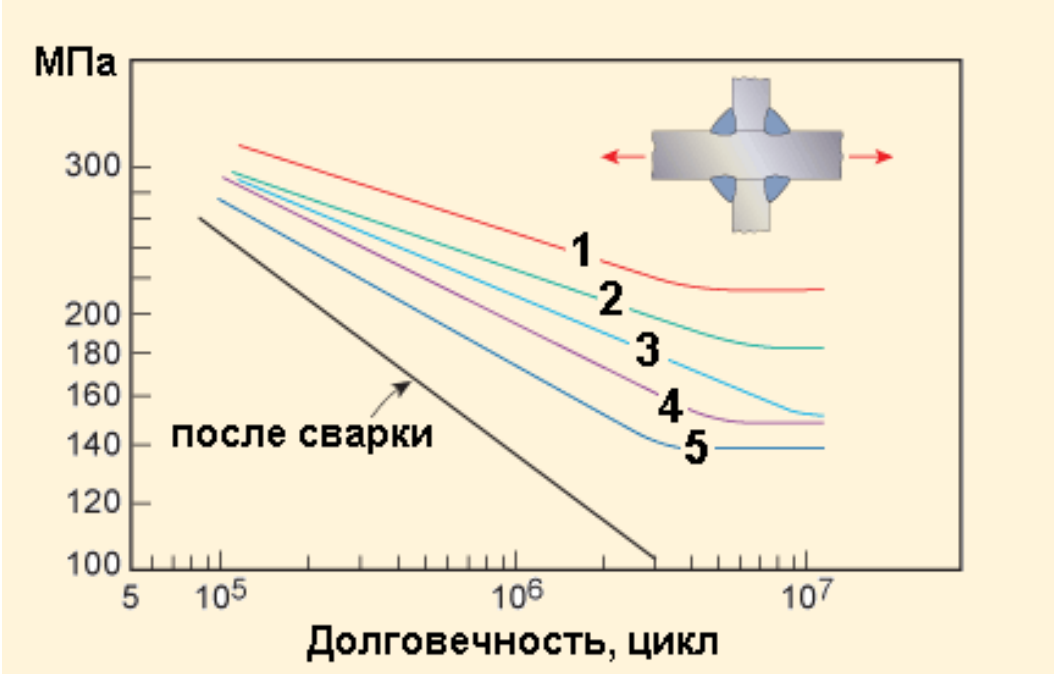


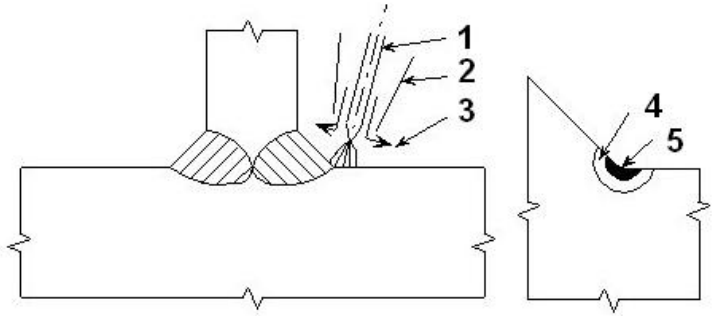


Повышение усталостной прочности сварных соединений (после сварки)



Абразивная обработка кромки шва





Оплавление кромки шва

1. Проковка молотком; (сжимающие ОН)

2. Удаление усиления шва абразивным инструментом; (снижение КН)

3. Дробеструйная обработка; (сжимающие ОН)

4. Оплавление границы шва; (снижение КН)

5. Абразивная зачистка границы шва. (снижение КН)

Влияние податливости соединяемых деталей на распределение напряжений в сварных соединениях

Конструкционная прочность сварных соединений маложестких деталей

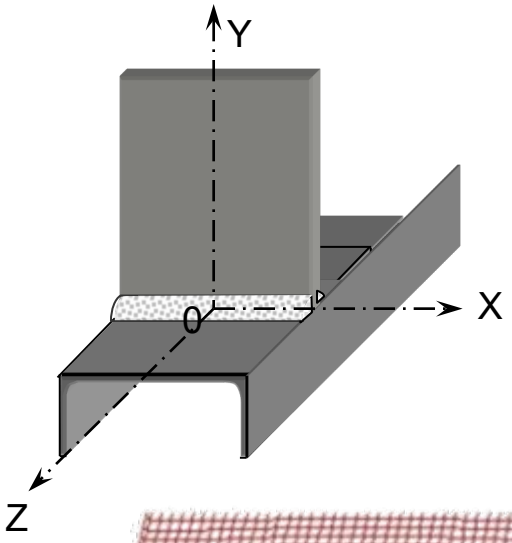
Разрушение образца со швом на всю высоту стенки швеллера ($P_{раз\ 1}$= 13 000 кг)

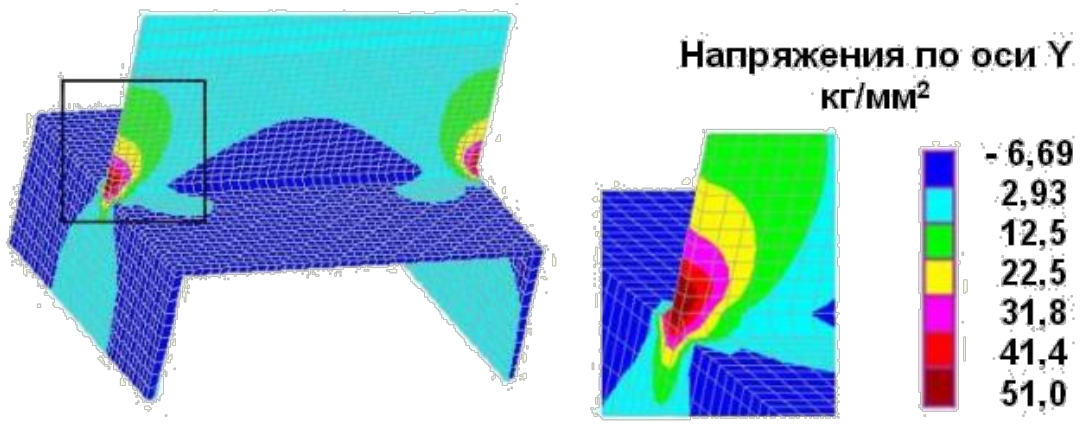
Разрушение образца со швами длиной 30 мм ($P_{раз\ 2}$=11 800 кг)

Разрушение образца с разгруженными концами швов

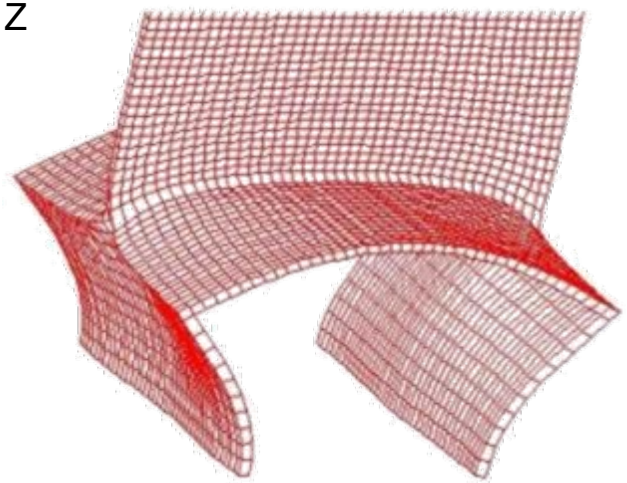
$P_{раз\ 3}$ = 36 000 кг

Локальное напряженное состояние тонкостенных сварных соединений

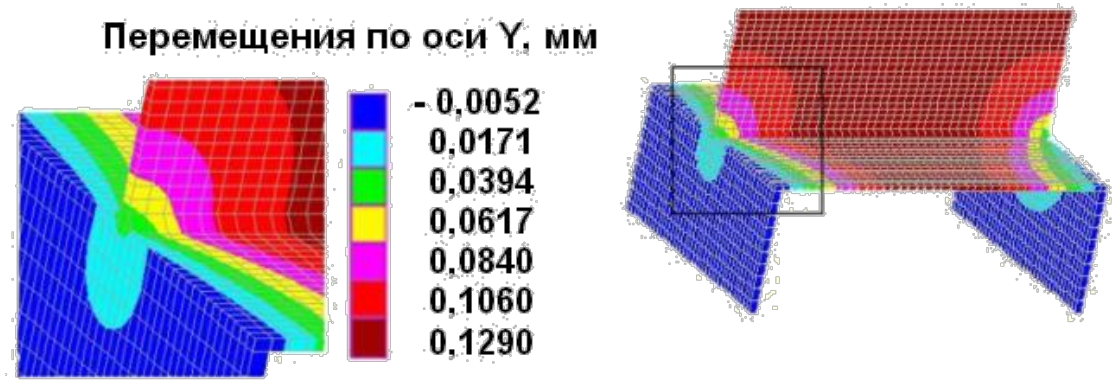




Поля напряжений в образце с неравномерной податливостью.

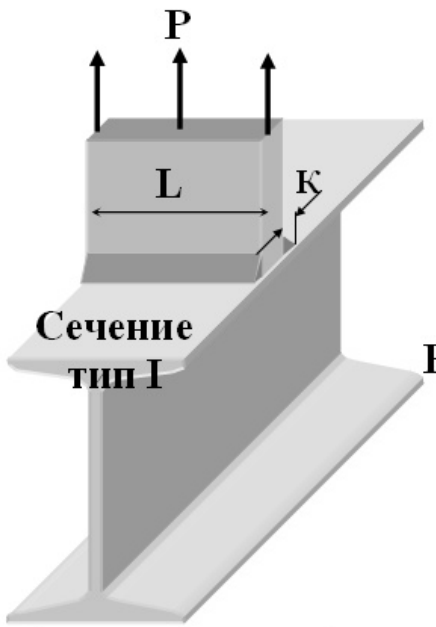


Деформационная картина при нагружении образца с неравномерной податливостью.



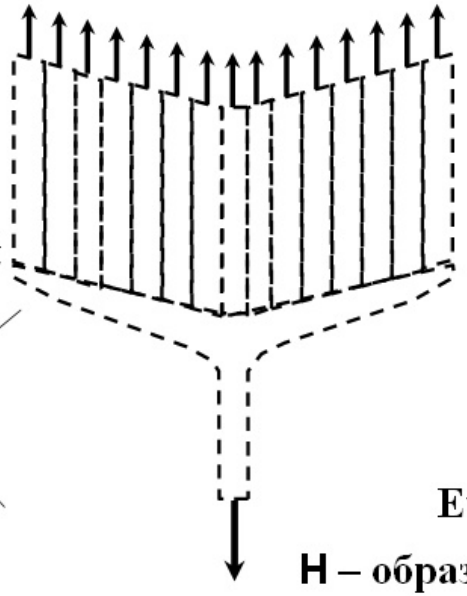
Поля перемещений в образце с неравномерной податливостью.

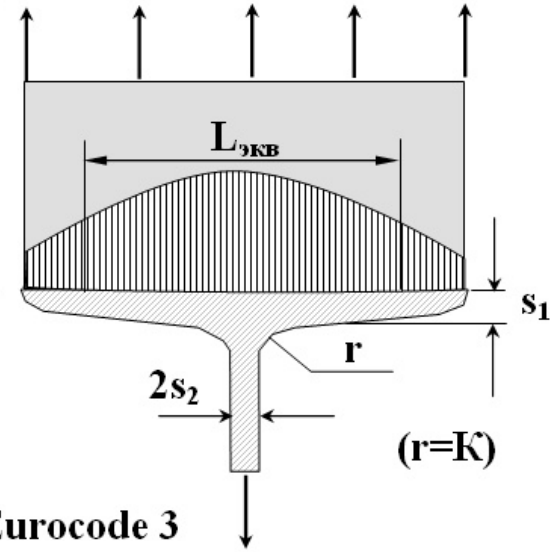
Расчет швов с учетом податливости соединяемых элементов



$P(L) = const$

$$\tau = \frac{P}{2\beta KL}$$





Eurocode 3

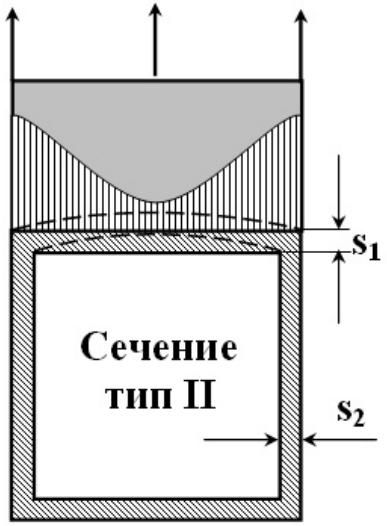
H – образный профиль (тип I)

$$L_{экв} = 2s_2 + 2r + 7Cs_1 < L$$

□ – образный профиль (тип II)

$$L_{экв} = 2s_2 + 5Cs_1 < L$$

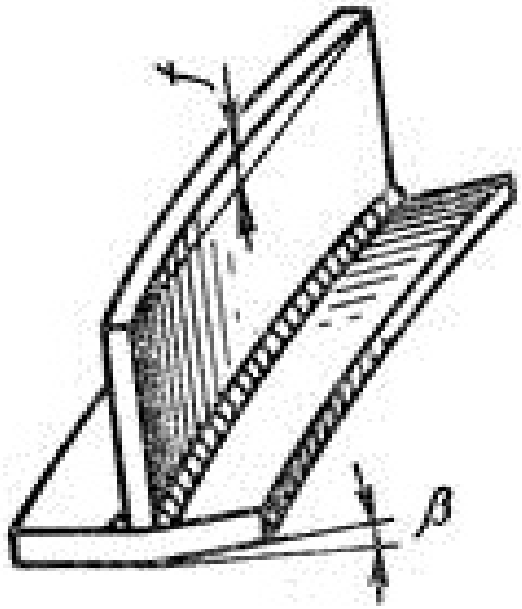
$$C = \frac{S_{полки}\sigma_{02}^{полки}}{S_{пласт}\sigma_{02}^{пласт}} \le 1$$



$P(L) \neq const$

$$\tau = \frac{P}{2\beta KL_{экв}}$$

Деформации и напряжения при сварке



Негативные последствия напряжений и деформаций, возникающих при сварке

Временные напряжения и деформации

- Способствуют образованию горячих трещин, смещения или угловатости кромок.
- Изменяют пространственное расположение свариваемых кромок, что осложняет автоматизацию и роботизацию сварки, ухудшает теплоотвод, изменяет зазор в стыке.
- Способствуют деформационному старению.
-

Остаточные напряжения

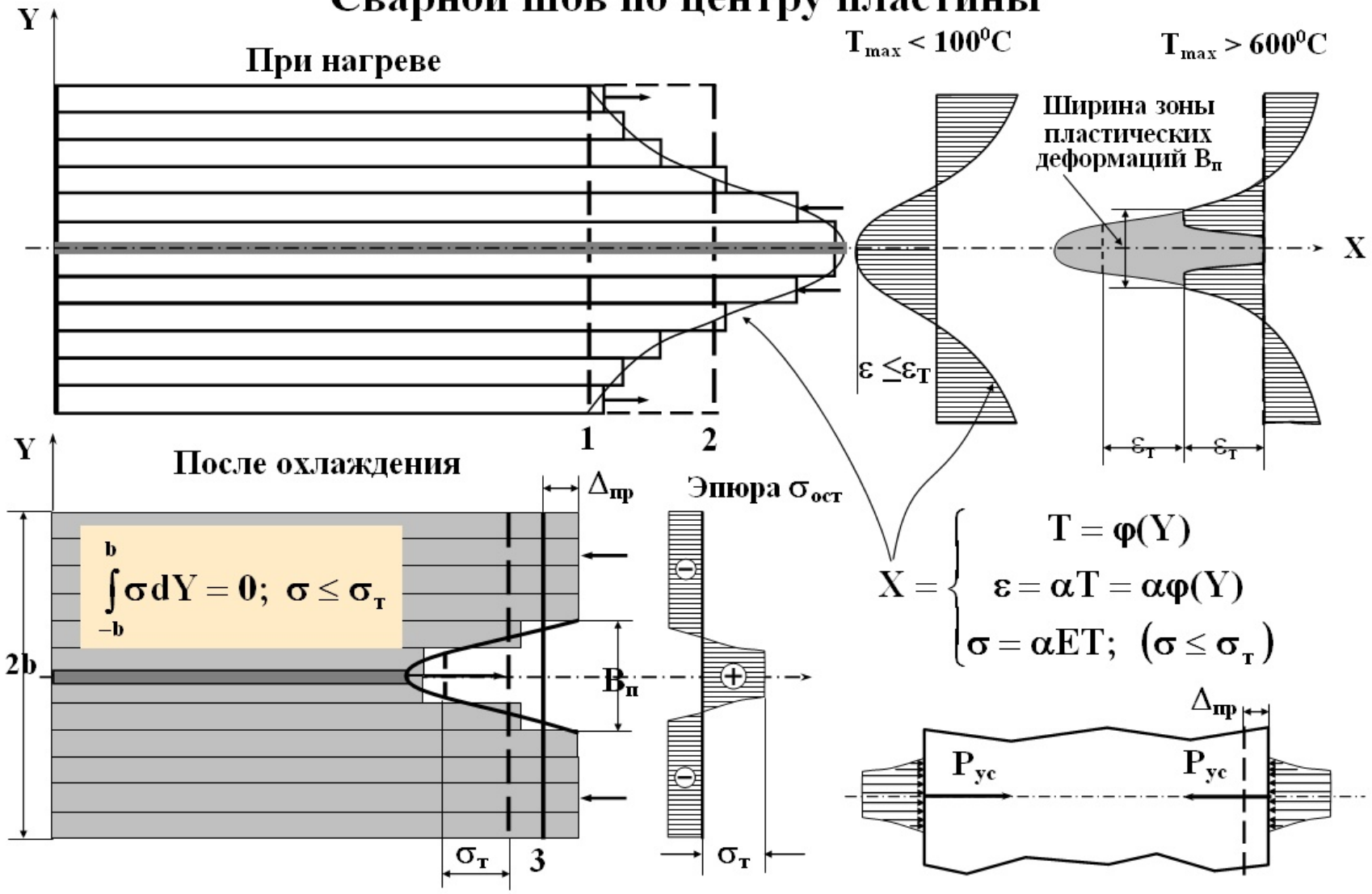
- Увеличивают накопленную в конструкции потенциальную энергию, что усиливает негативные последствия разрушения.
- Снижают сопротивление коррозионному растрескиванию.
- Способствуют развитию хрупкого разрушения.
- Снижают усталостную прочность.
- Способствуют образованию холодных трещин.

Остаточные деформации

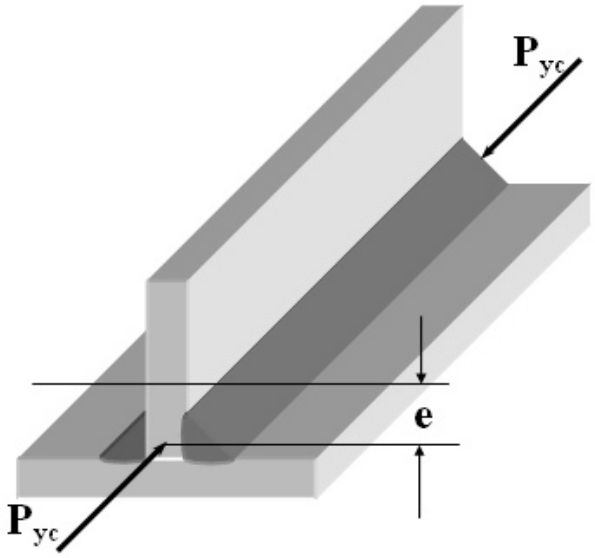
- Ухудшают товарный вид конструкции.
- Затрудняют сборку сварных узлов.
- Затрудняют балансировку.
- Снижают точность изготовления.
- Увеличивают объем механической обработки.
- Снижают сопротивление потере устойчивости при сжимающей нагрузке

Пример остаточных деформаций обшивки корпуса корабля

Сварной шов по центру пластины



Осевые деформации при сварке

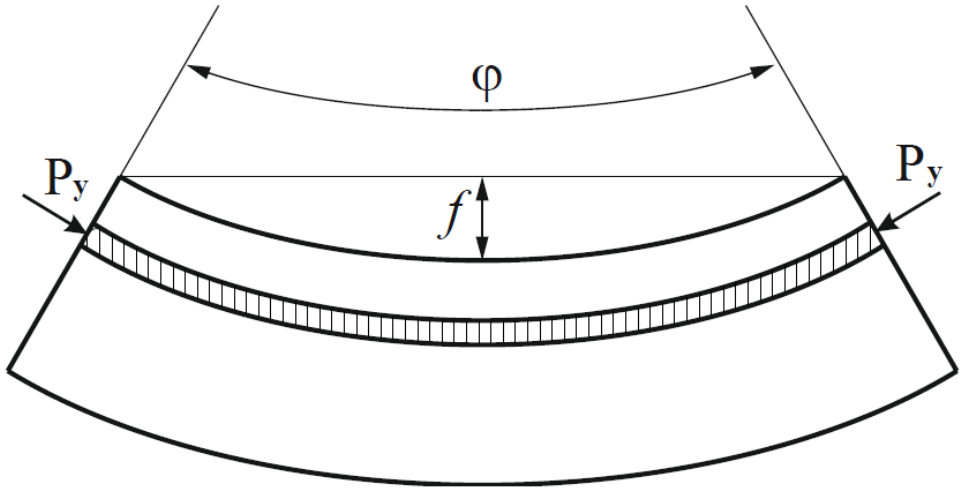


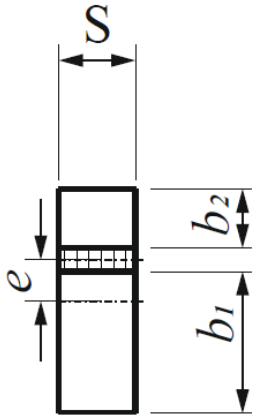
$$M_{и} = P_{у} e$$

$$\varphi = \frac{P_{у} e l}{EI}$$

$$f = \frac{ML^2}{8EI} = \frac{P_{ус} e L^2}{8EI}$$

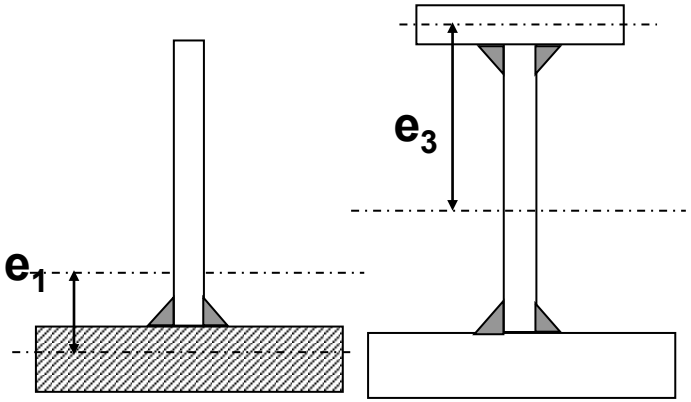
$$\Delta = \frac{P_{ус} L}{EF}$$



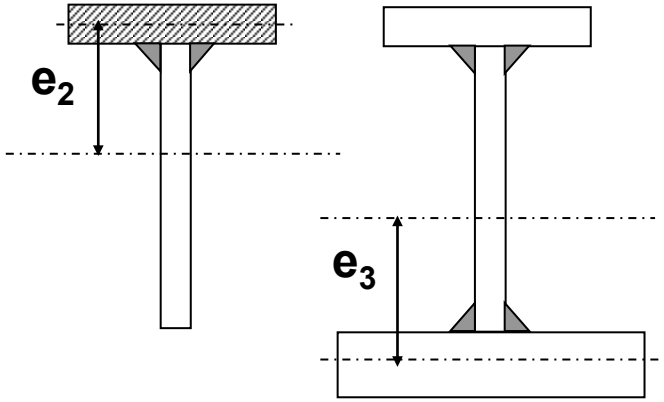


Появление остаточных деформаций изгиба продольной оси

Вариант 1

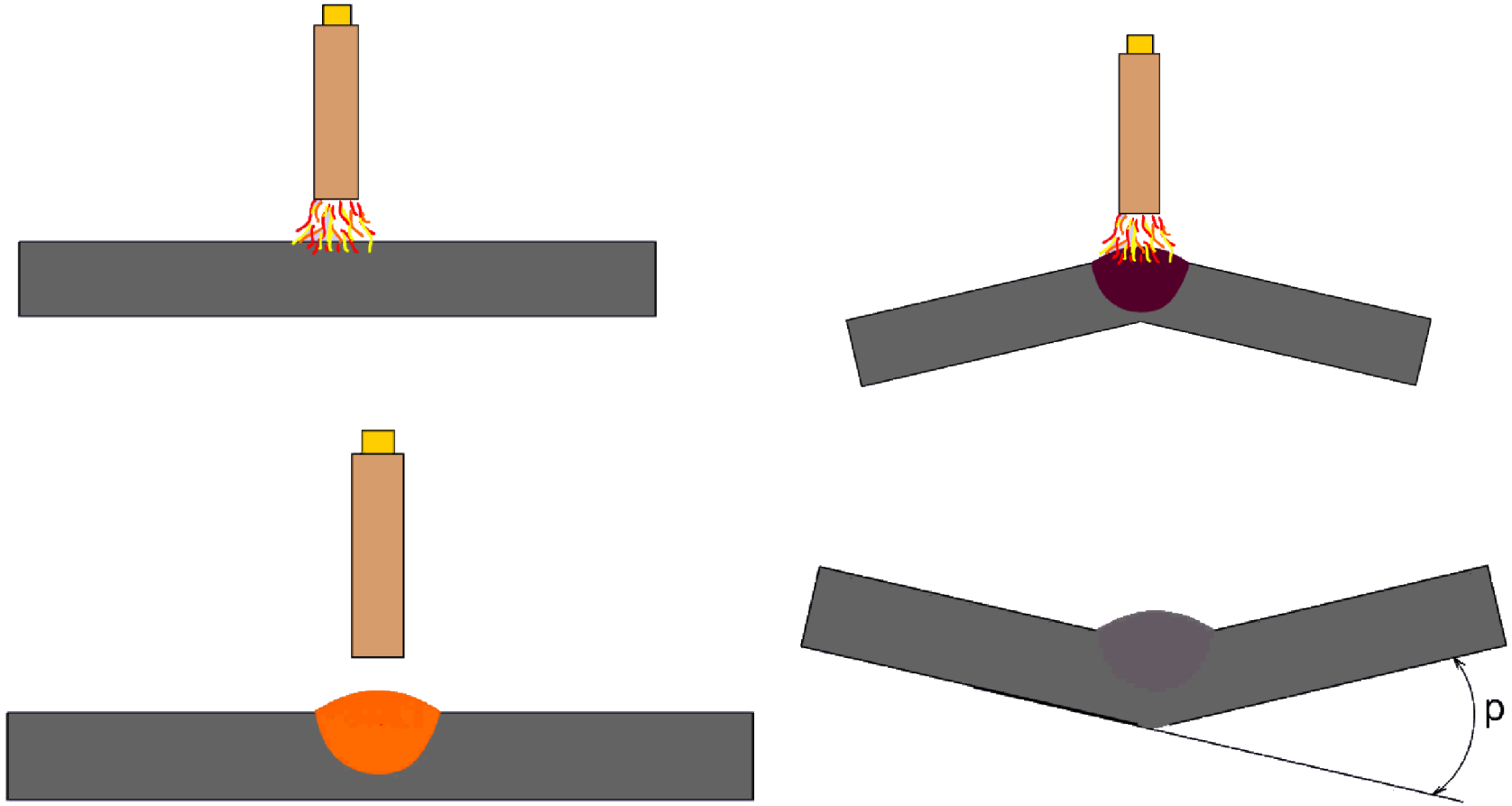


Вариант 2

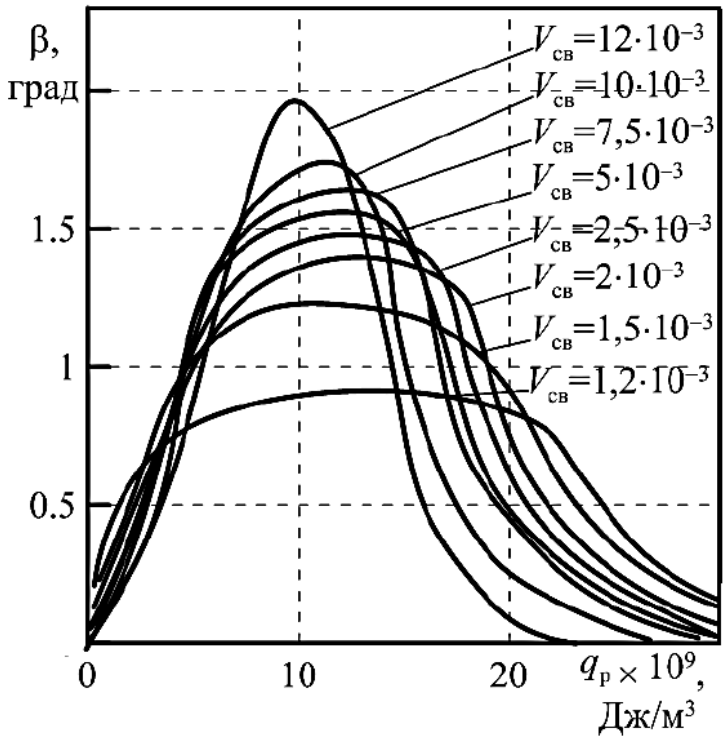


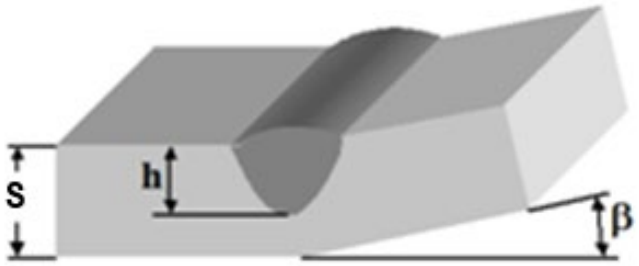
Угловые деформации при сварке

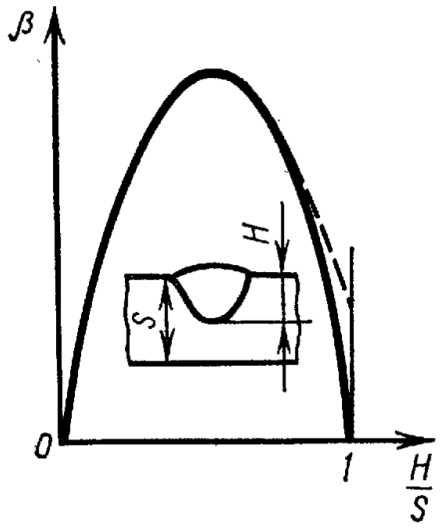
Образование угловых деформаций при наплавке валика



Влияние режима сварки на величину угловой деформации







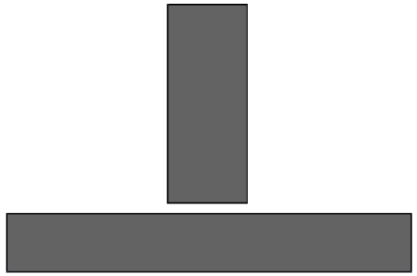
погонная энергия дуги

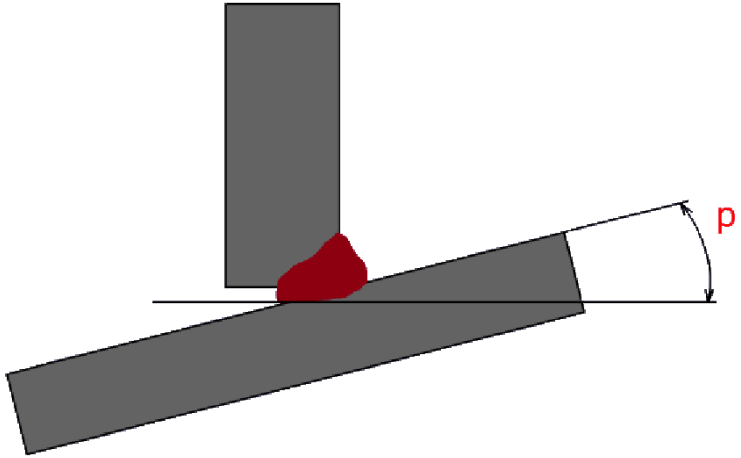
Эффективная мощность

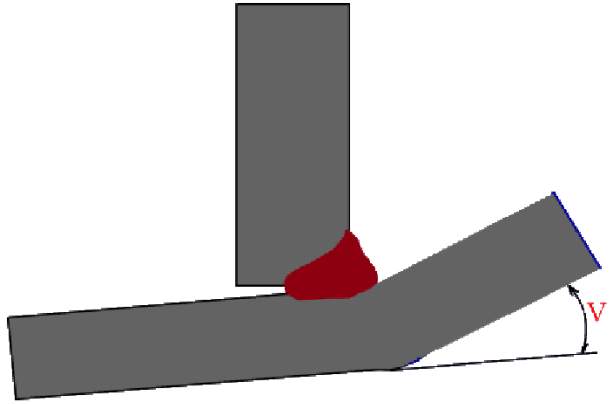
$$q_р = \frac{q}{V_{св} S^2}$$

$$q = \eta I_{св} U_д$$

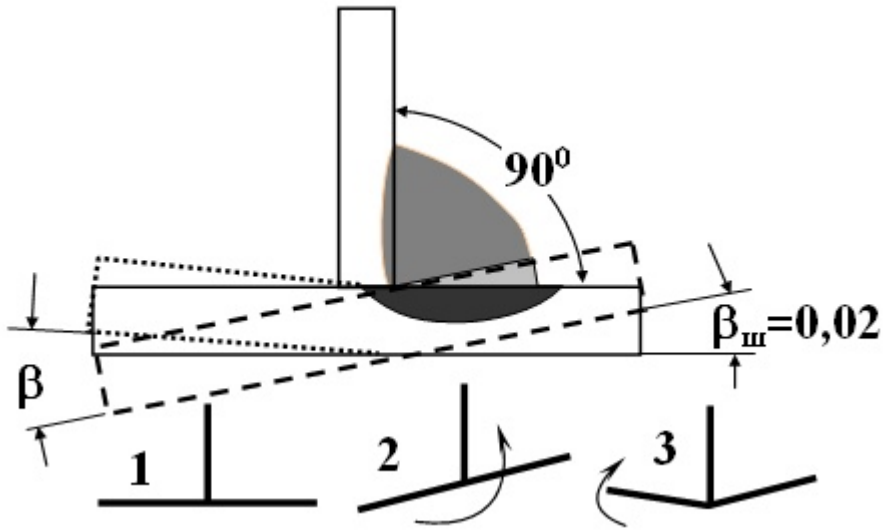
Образование угловых деформаций при выполнении таврового соединений

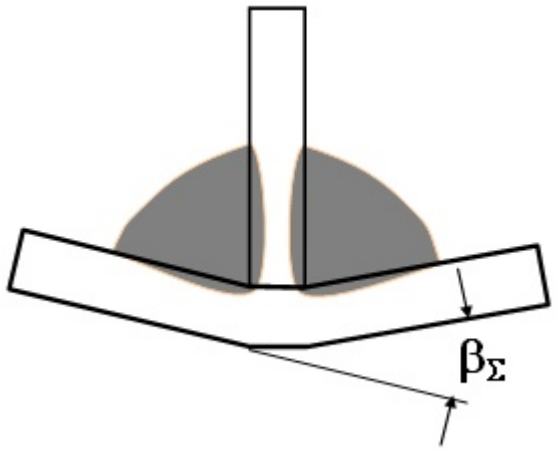






Угловая деформация в тавровых сварных соединениях

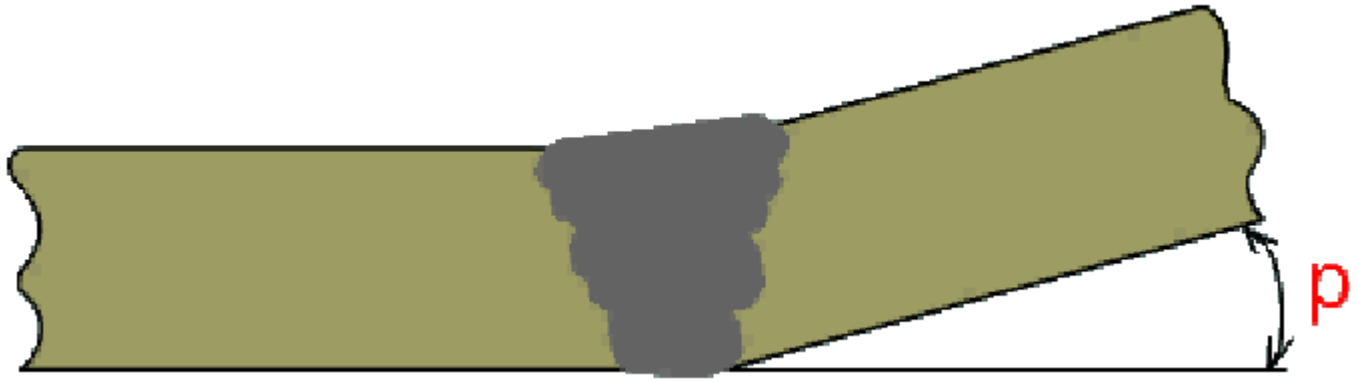




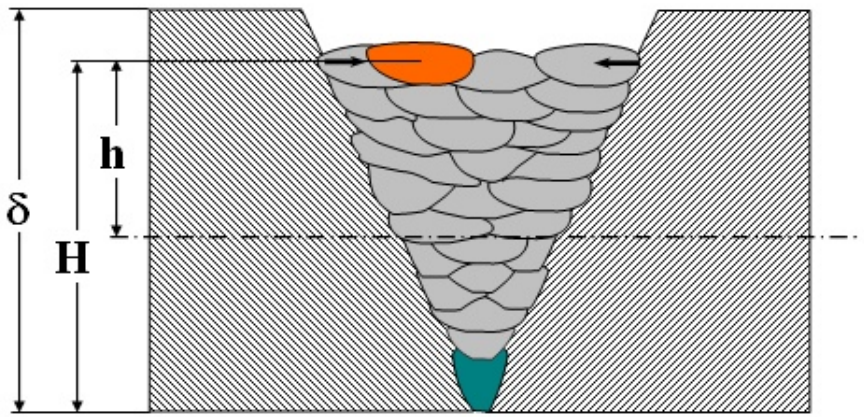
для $\frac{K}{\delta} \le 0,5$

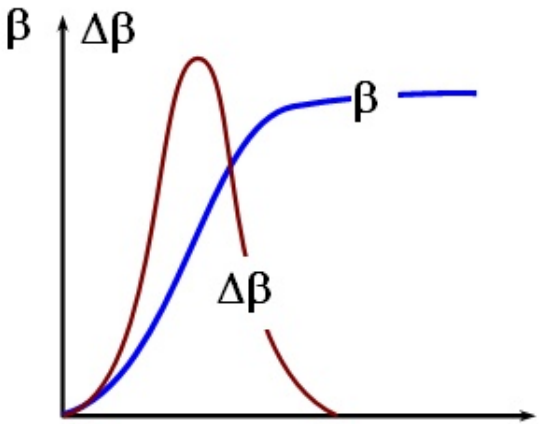
$$\beta_{\Sigma} \approx 0,1\left(\frac{K}{\delta} - 0,1\right)$$

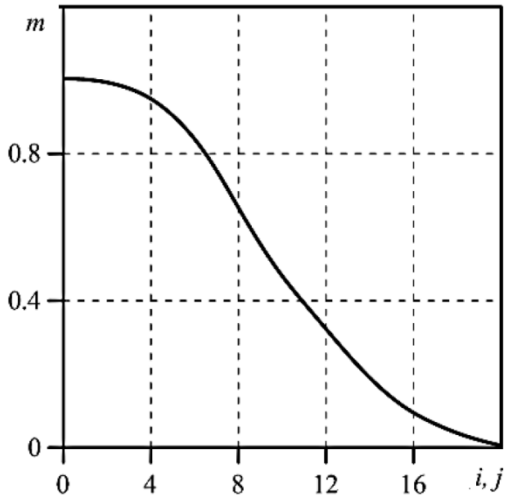
Образование угловых деформаций при однопроходной сварке стыкового соединения с разделкой кромок

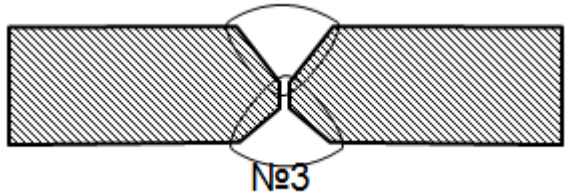


Угловая деформация при многопроходной сварке





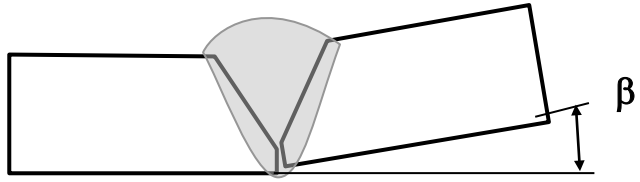


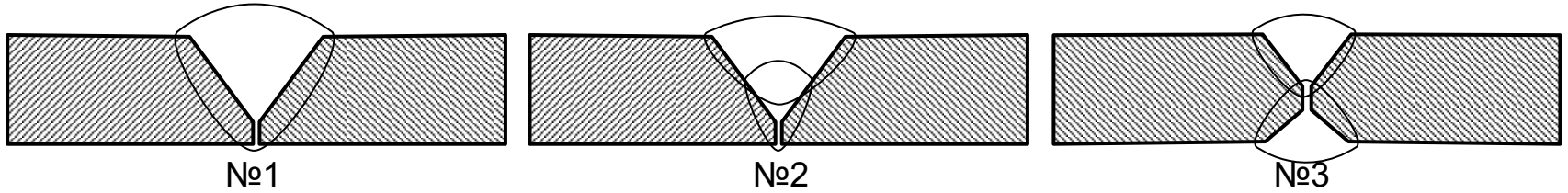


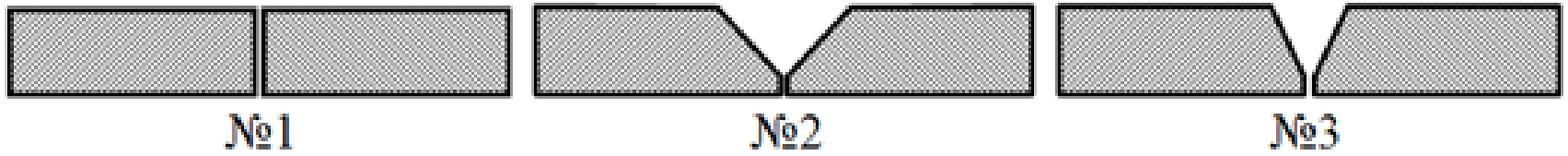
$$\beta = \beta_1 - \beta_2$$

$$\beta = \sum_i \beta_i m_i - \sum_j \beta_j m_j$$

Возможные угловые деформации при сварке листов в стык



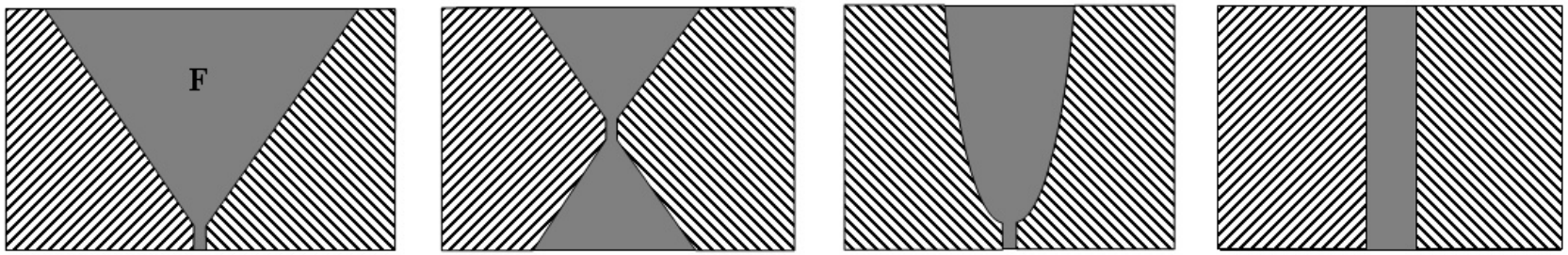


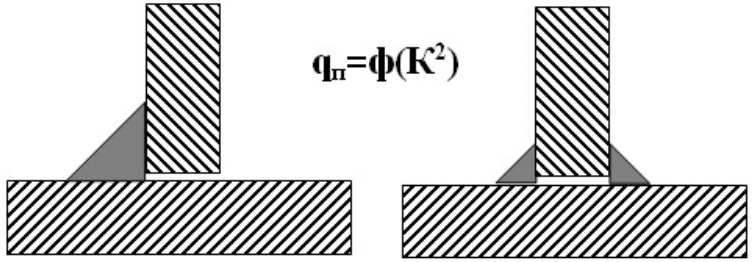


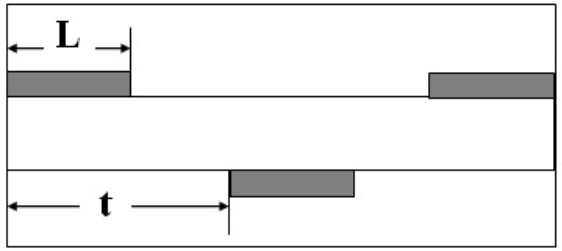
Методы уменьшения деформаций и напряжений в сварных конструкциях на стадии проектирования

Уменьшать объема наплавленного металла за счет: $q_п = \varphi(F)$

- **Уменьшения насыщенности конструкции сварными швами.**
- **Уменьшения угла разделки кромок (щелевая разделка).**
- **Применения способов сварка с глубоким проплавлением и низким удельным тепловложением.**
- **Применения швов с расчетно-обоснованным размером сечения.**
- **Применения двухсторонних угловых швов меньшего катета взамен односторонним.**
- **Применения прерывистых швов.**



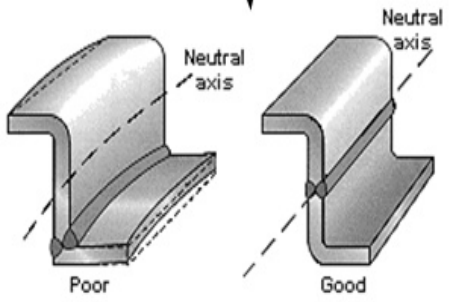


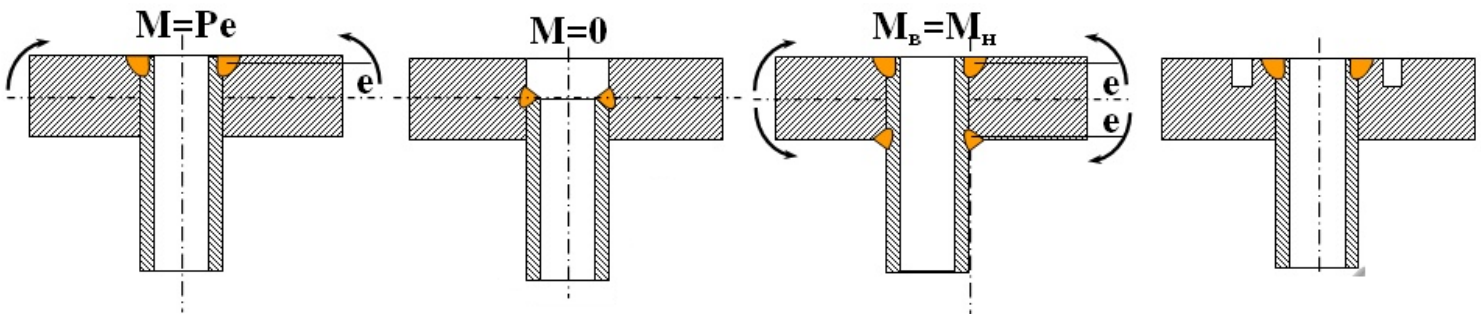


$$P_{ус}^{пр} = P_{ус}\frac{L}{t}$$

Методы уменьшения деформаций и напряжений в сварных конструкциях на стадии проектирования

1. Располагать сварные швы ближе к оси центров тяжести сечения конструкции.
2. Располагать сварные швы симметрично.
3. Расчленять конструкции на узлы с симметрично расположенными швами.
4. Обеспечивать свободу протекания сварочных деформаций.
5. Избегать размещения швов близко друг к другу или к жесткостям.
6. Избегать скопления швов на ограниченном участке.
7. Избегать размещения швов вблизи геометрических неоднородностей.
8. Применять гофрирование тонколистовых элементов.
9. Предусматривать припуск на предполагаемые деформации.
10. Обеспечивать доступность швов для выполнения операций правки.

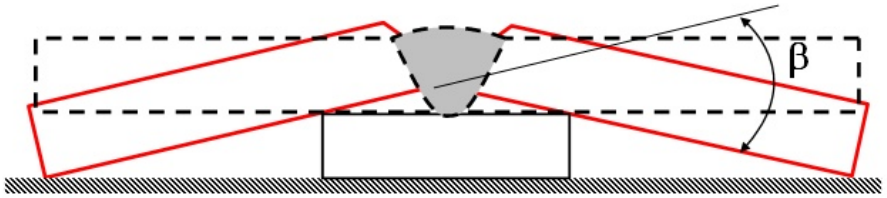


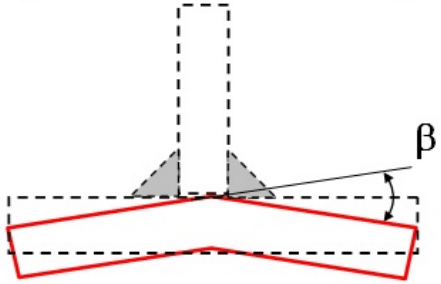


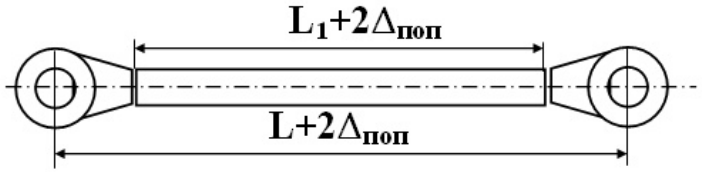
Методы уменьшения остаточных деформаций на стадии изготовления

1. Сборка с учетом предполагаемых деформаций

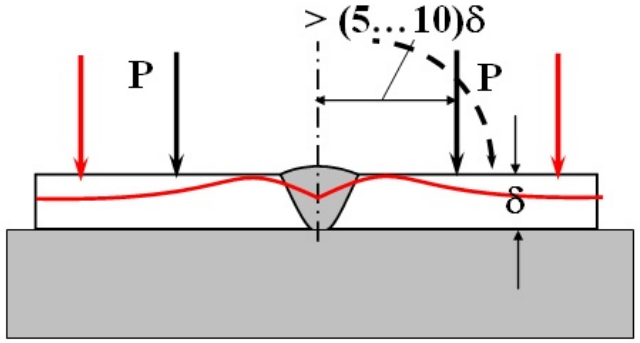
2. Изготовление деталей с учетом предполагаемых деформаций



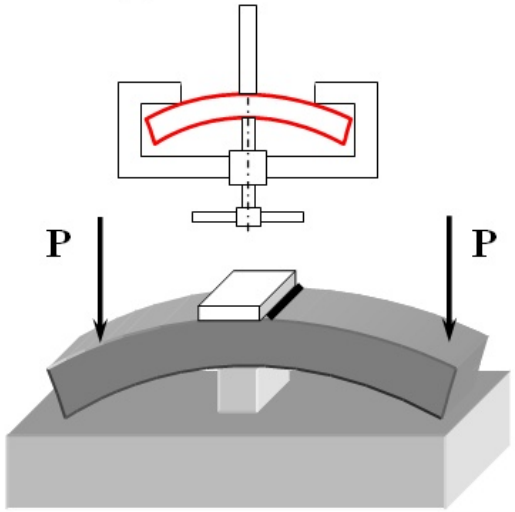




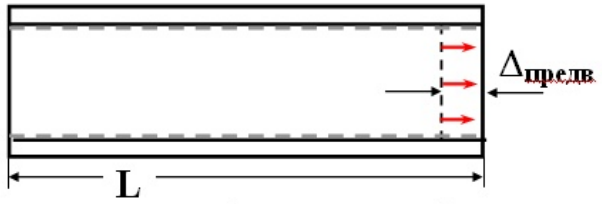
3. Жесткое закрепление



4. Упругий изгиб

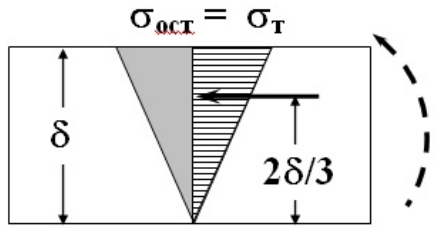


5. Упругое растяжение



$$\sigma_{ост} = \frac{(\sigma_т - \sigma_{предв})2F_в}{F} < 1{,}7\sigma_{кр};$$

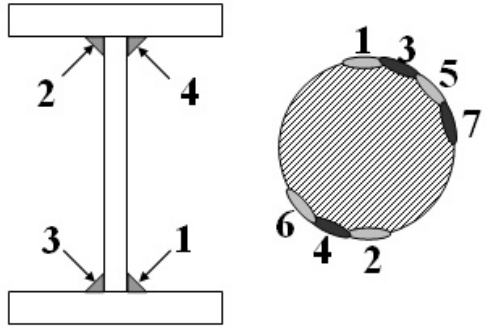
$$F_в = \frac{P_{ус}}{\sigma_т}; \qquad \sigma_{предв} = \frac{\Delta_{предв}}{L}E$$



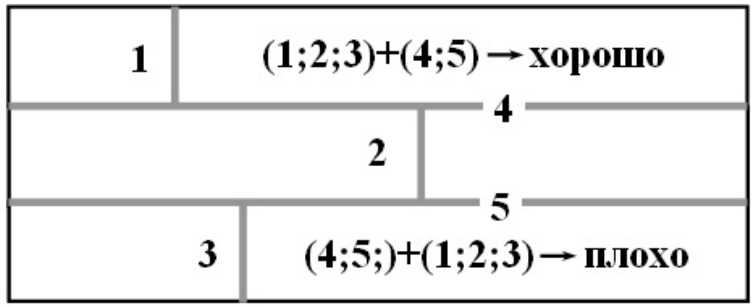
$$P = \left(\frac{1}{15} \dots \frac{1}{30}\right)\sigma_т \delta$$

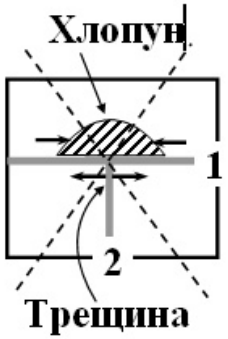
Рациональная последовательность выполнения сварных швов

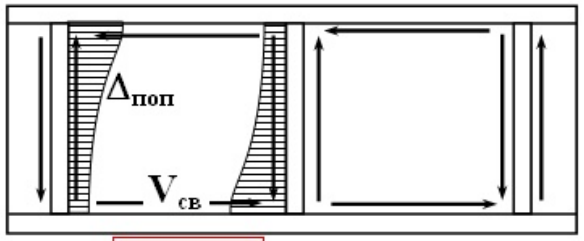
1. Последующие швы должны вызывать деформацию противоположного знака по отношению к предыдущим.



2. Поперечные швы сваривают перед продольными.





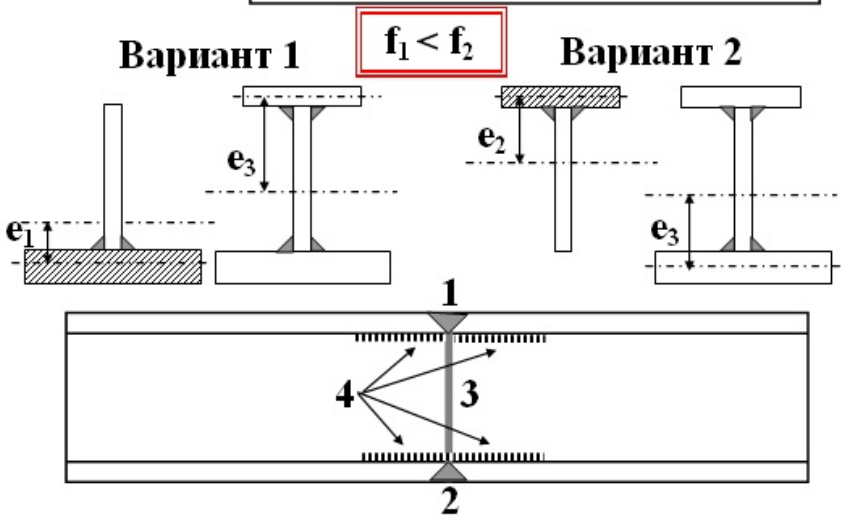


3. Параллельные швы желательно сваривать в противоположном направлении.

4. Первыми сваривают между собой детали, имеющие наибольшую площадь сечения.

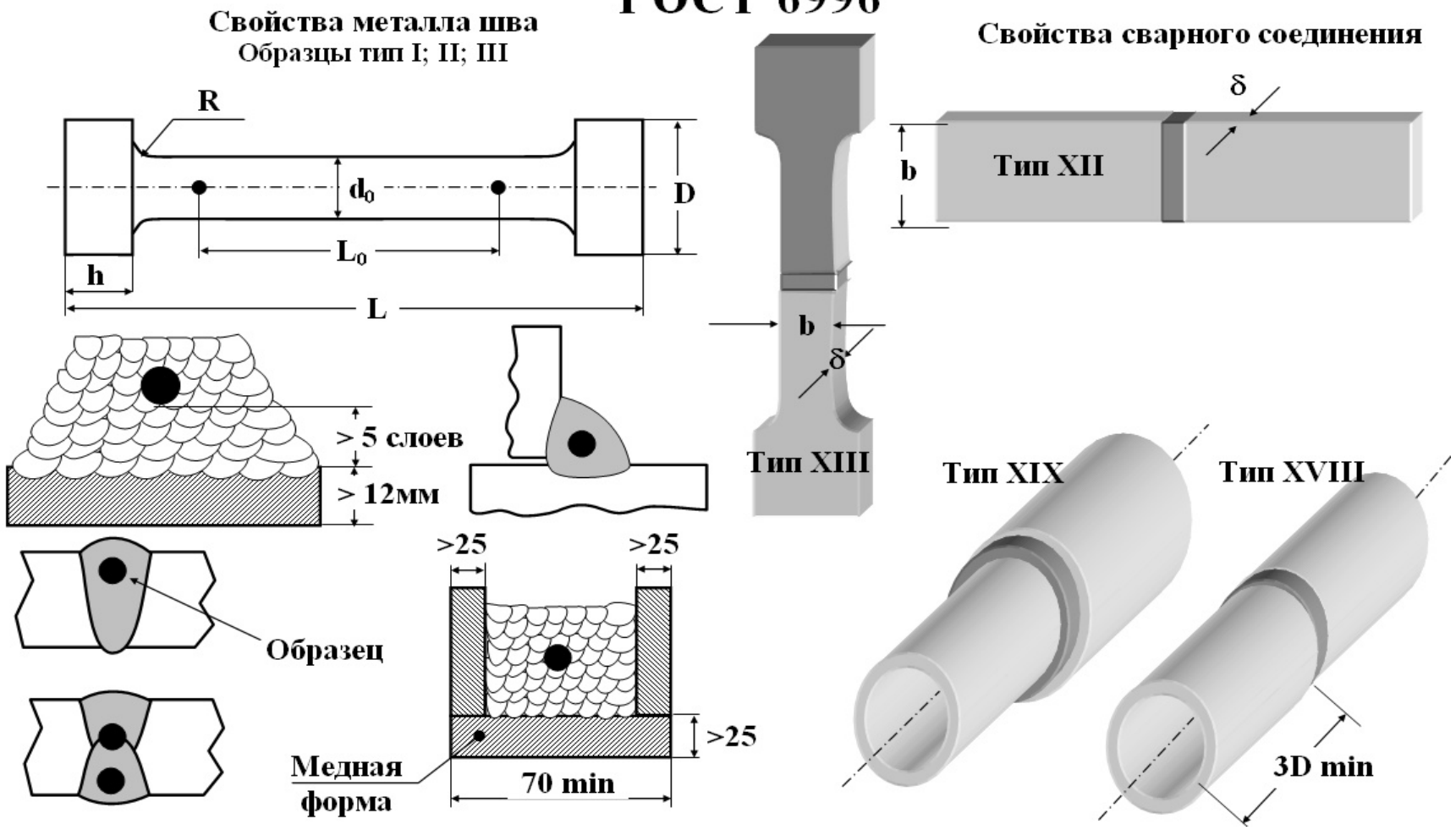
5. Первыми сваривают стыковые, затем угловые швы.

6. Выбранная последовательность не должна ограничивать податливость соединяемых элементов.

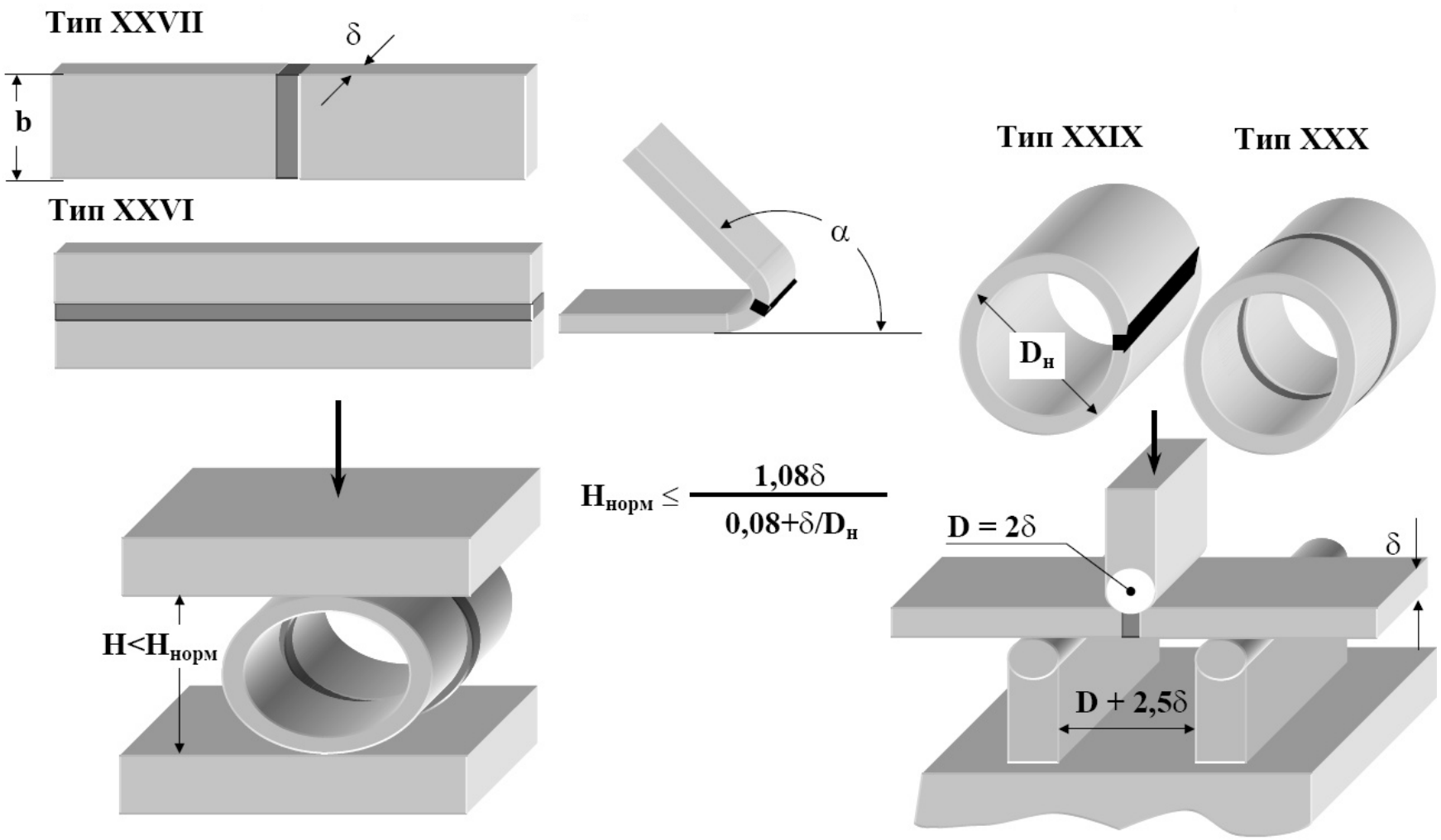


Экспериментальная оценка механических свойств сварных соединений и конструкций

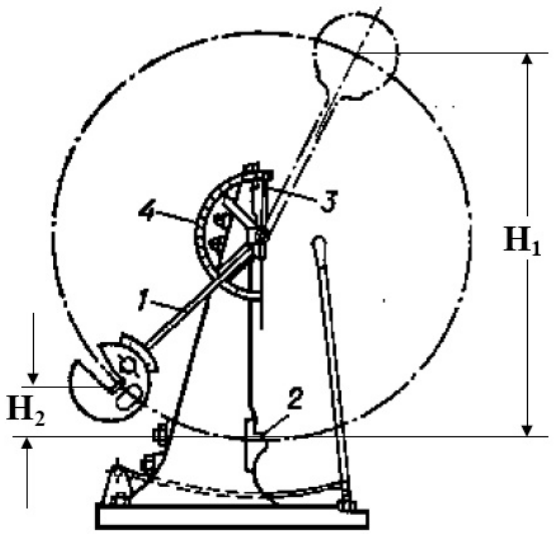
Определение механических свойств сварных соединений при растяжении
ГОСТ 6996

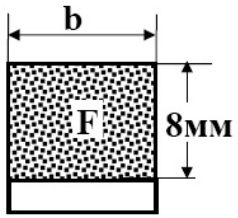


Испытания сварных соединений на статический изгиб по ГОСТ 6996

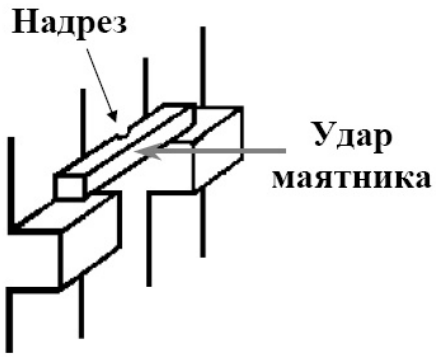


Испытания различных зон сварного соединения на ударный изгиб по ГОСТ 6996

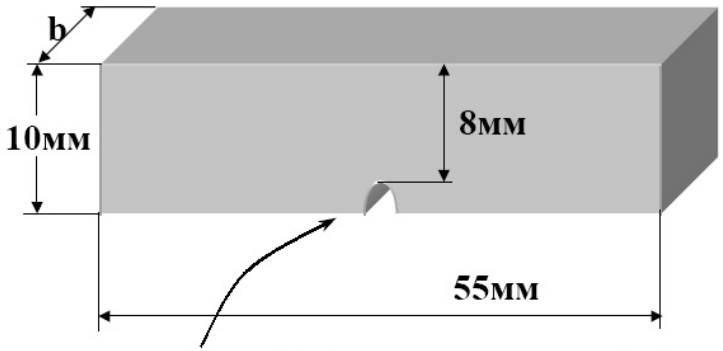


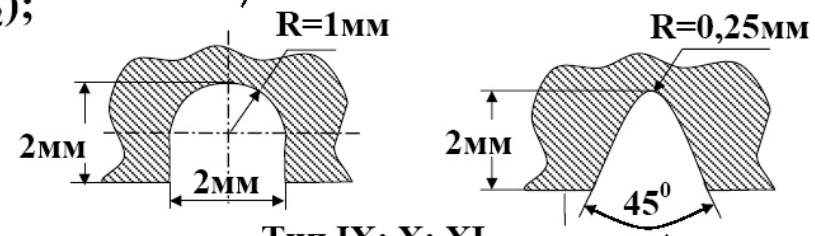


$$A = mg\,(H_1 - H_2);$$
$$A_н = A/F$$

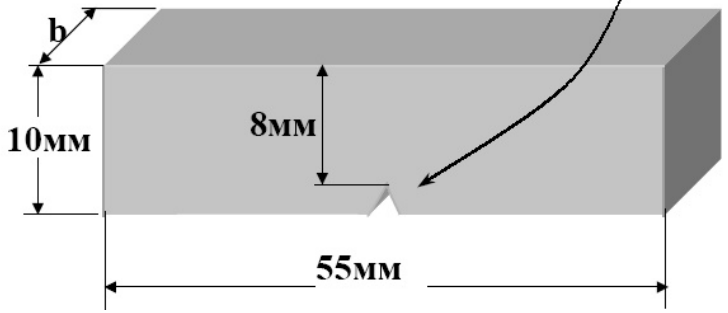


Тип VI; VII; VIII

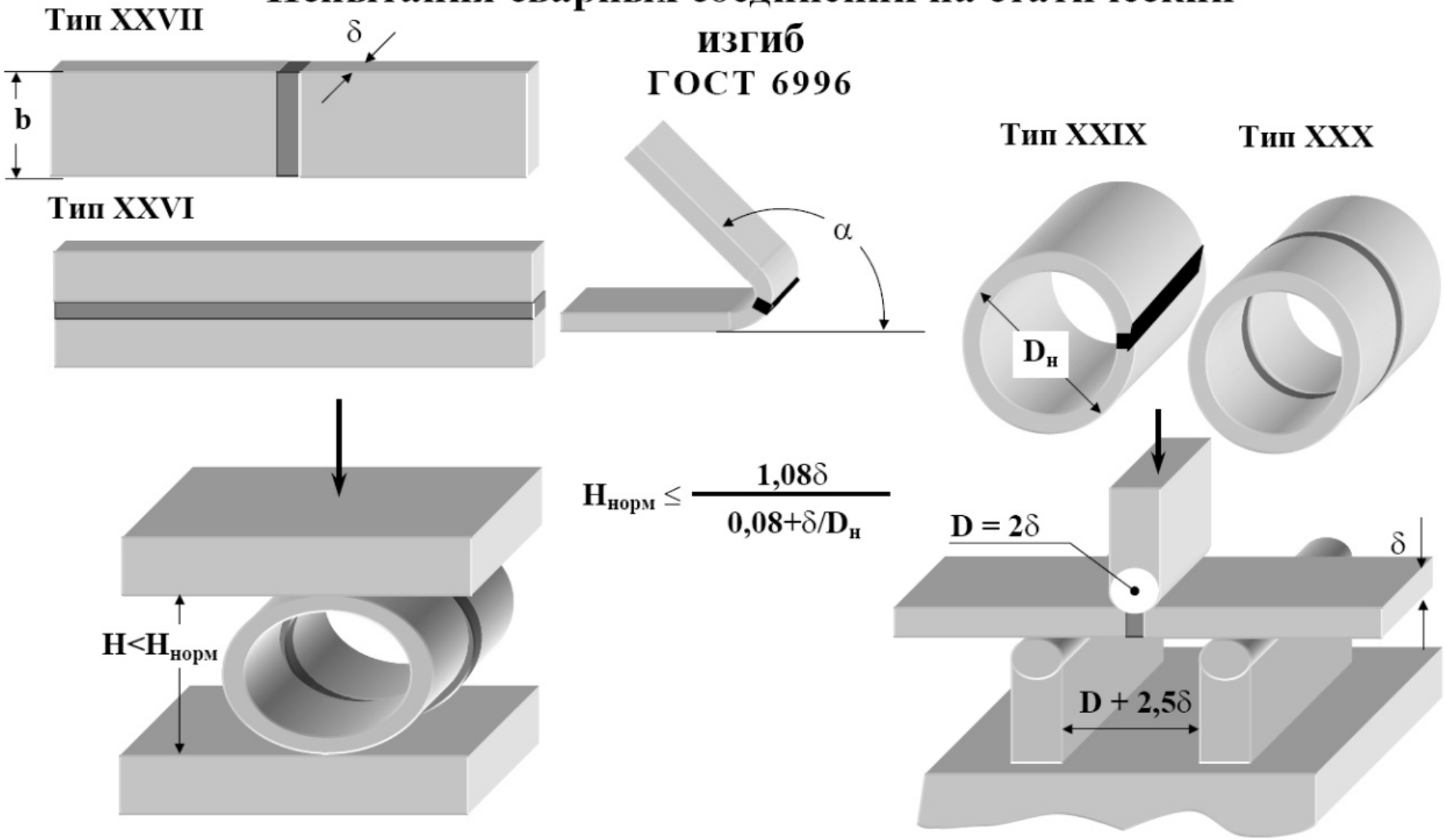




Тип IX; X; XI



Тип VI; IX– b = 10мм;
Тип VII; X – b = 5мм;
Тип VIII; XI – b = δ

Испытания сварных соединений на статический изгиб

ГОСТ 6996