ТИПОВЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ИЗДЕЛИЯ
И УЗЛЫ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

Серия 2.440-2

УЗЛЫ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ЗДАНИЙ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Выпуск 7

БОЛТОВЫЕ ФЛАНЦЕВЫЕ РАМНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ БАЛОК С КОЛОННАМИ СТАЛЬНЫХ КАРКАСОВ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

**Материалы для проектирования
и рабочие чертежи
с программным обеспечением**

gost.e-ecolog.ru

ТИПОВЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ИЗДЕЛИЯ
И УЗЛЫ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

Серия 2.440-2

УЗЛЫ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ЗДАНИЙ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Выпуск 7

БО́ЛТОВЫЕ ФЛАНЦЕВЫЕ РАМНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ БАЛОК С КОЛОННАМИ СТАЛЬНЫХ КАРКАСОВ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

Материалы для проектирования
и рабочие чертежи
с программным обеспечением

Разработаны

НИПИПромстальконструкция

Зам. директора института

_____ В.В. Каленов

Зав. сектором

_____ А.Б. Павлов

Старший научный сотрудник

_____ В.М. Френкель

Научный сотрудник

_____ Д.И. Заболотных

Утверждены

Главным Управлением Проектирования и инженерных изысканий Госстроя России, письмо от 29.12.93 № 9-3-3/306

Введены в действие НИПИПромстальконструкция с 01.02.94, приказ от 12.01.84 № 2

Обозначение документа	Наименование	Стр.
Раздел 1	Пояснительная записка к программному обеспечению	3
Раздел 2	Методика расчета прочности, жесткости и деформативности рамных фланцевых соединений	22

РАЗДЕЛ 1. ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА К ПРОГРАММНОМУ ОБЕСПЕЧЕНИЮ

1. ОБЩАЯ ЧАСТЬ

1.1. Настоящий выпуск содержит рабочие чертежи КМ болтовых рамных соединений колонн со стропильными балками на фланцах для стальных каркасов отапливаемых и неотапливаемых зданий и сооружений различного назначения.

1.2. Рабочие чертежи КМ разработаны в машиноориентированном исполнении для персональных компьютеров, совместимых с IBM PC AT (программа FLANEC).

1.3. Рабочие чертежи КМ разработаны в дополнение к действующему типовому альбому «Серия 2.440-2. Узлы стальных конструкций производственных зданий промышленных предприятий. Выпуск 1. Шарнирные узлы балочных клеток и рамные узлы примыкания ригелей к колоннам. Чертеж КМ».

1.4. Чертежи основаны на принципиально новых подходах к расчету элементов и узлов стальных строительных конструкций, учитывающих реальную изгибную жесткость узлов, и разработаны по данным экспериментально-теоретических исследований, узлов, проведенных ВНИПИПромстальконструкция.

1.5. Приведенные узлы позволяют унифицировать соединения элементов и сами элементы стальных рам, что уменьшает трудозатраты при разработке документации на стальные конструкции на стадиях КМ и КМД, а также при изготовлении и монтаже конструкций и сокращает общий расход стали.

1.6. Узлы предназначаются для стальных рамных каркасов отапливаемых зданий, возводимых в районах с расчетной температурой минус 65 °С и выше и неотапливаемых зданий, возводимых в районах с расчетной температурой минус 40 °С и выше.

1.7. Узлы могут применяться в зданиях, эксплуатируемых в районах несейсмических и сейсмических до 9 баллов включительно.

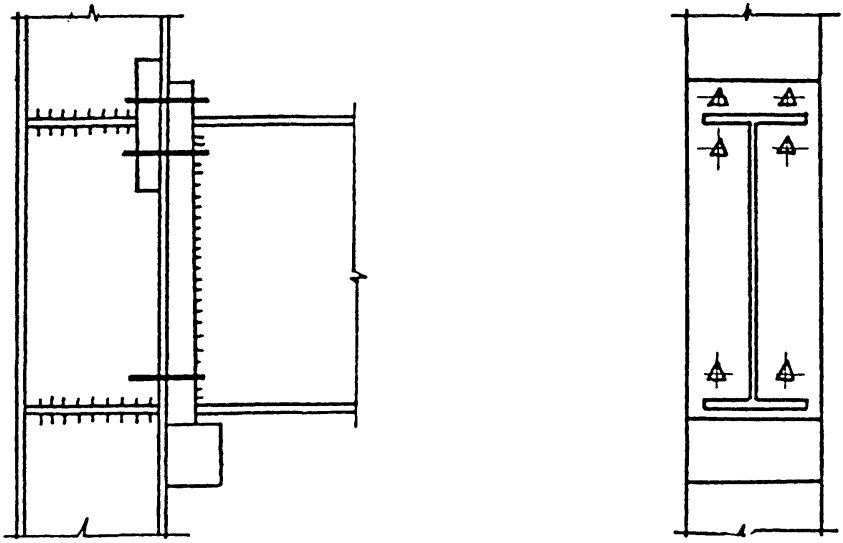
2. КОНСТРУКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ

2.1. Разработанные узлы (рис. 1) позволяют осуществить соединения балок любого модульного пролета из двутавров стальных горячекатаных с параллельными гранями полок типа Б и III по ГОСТ 26020—83 с колоннами из двутавров стальных горячекатаных с параллельными гранями полок типа III и К по ГОСТ 26020—83. Профили балок и колонн приняты по сокращенному сортаменту металлопроката для применения в строительных стальных конструкциях, утвержденному постановлением Госстроя СССР от 18 декабря 1990 г. № 110 [1], и по европейскому сортаменту металлопроката [2]. Передача изгибающих моментов и нормальных сил с балок на колонны осуществляется через фланец и болты, передача поперечных сил — через опорный столик.

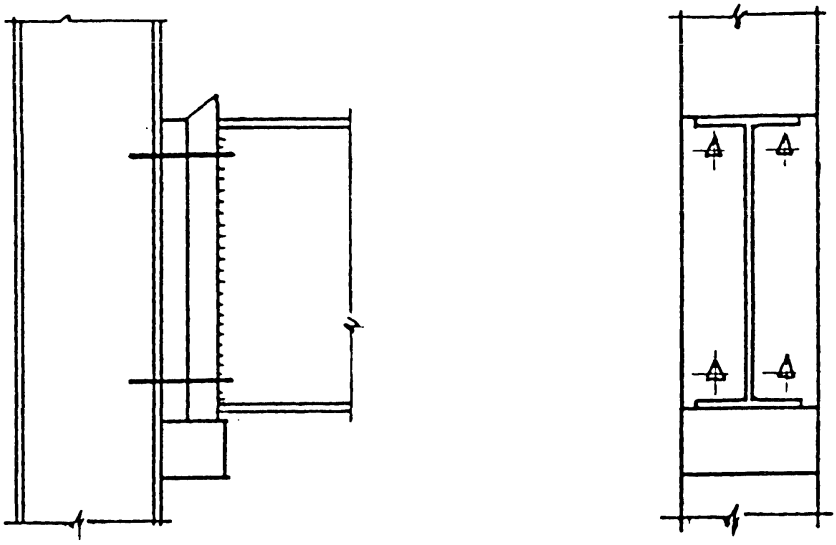
2.2. В зависимости от конструктивной формы фланцы подразделяются на девять типов (рис. 2).

2.3. В колоннах могут устанавливаться горизонтальные и наклонные ребра жесткости и обратные накладки.

2.4. Соединения элементов в узлах предусмотрены на высокопрочных болтах из стали 40Х «Селект» климатического исполнения ХЛ с временным сопротивлением разрыву не менее 1100 МПа по ГОСТ 22353—77, гайки и шайбы к ним — высокопрочные по ГОСТ 22354—77 и ГОСТ 22355—77. Факультативно в программе FLANEC предусмотрены болты класса точности В по ГОСТ 1759.1—82 классов прочности 5.8, 8.8 и 10.9 по ГОСТ 1759.0—87 и ГОСТ 1759.4—87, гайки — по ГОСТ 1759.5—87 для болтов классов прочности 5,8 и 8,8 соответственно классов прочности 5, 8 и 10, шайбы — по ГОСТ 18123—82.



а)

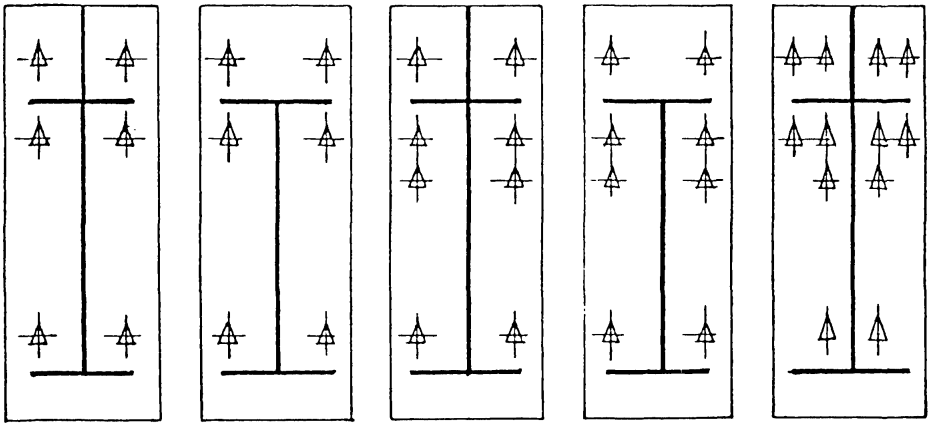


б)

Рис. 1. Конструктивные решения рамных фланцевых соединений

а) Серия 2.440-1. Рамный узел.
б) Серия 2.440-2. Шарнирный узел.

Тип 1 Тип 2 Тип 3 Тип 4 Тип 5



Тип 6 Тип 7 Тип 8 Тип 9

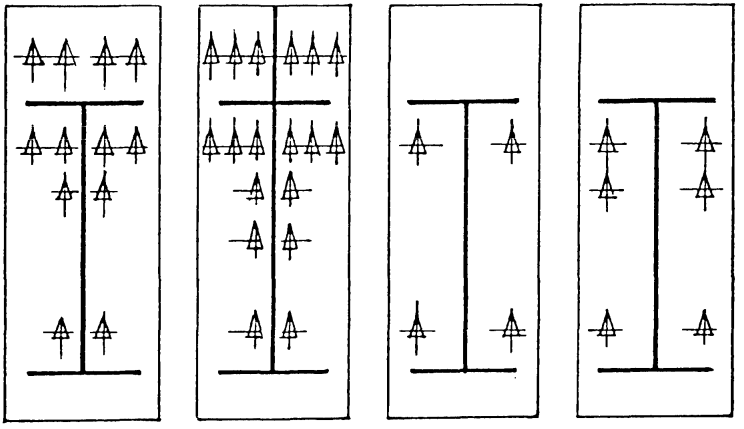


Рис. 2. Типы исследуемых фланцев

2.5. Болты могут применяться с контролируемым и неконтролируемым предварительным натяжением. Болты с неконтролируемым предварительным натяжением должны использоваться в конструкциях, воспринимающих статическую нагрузку.

2.6. Диаметры болтов приняты М16, М20, М24 и М27.

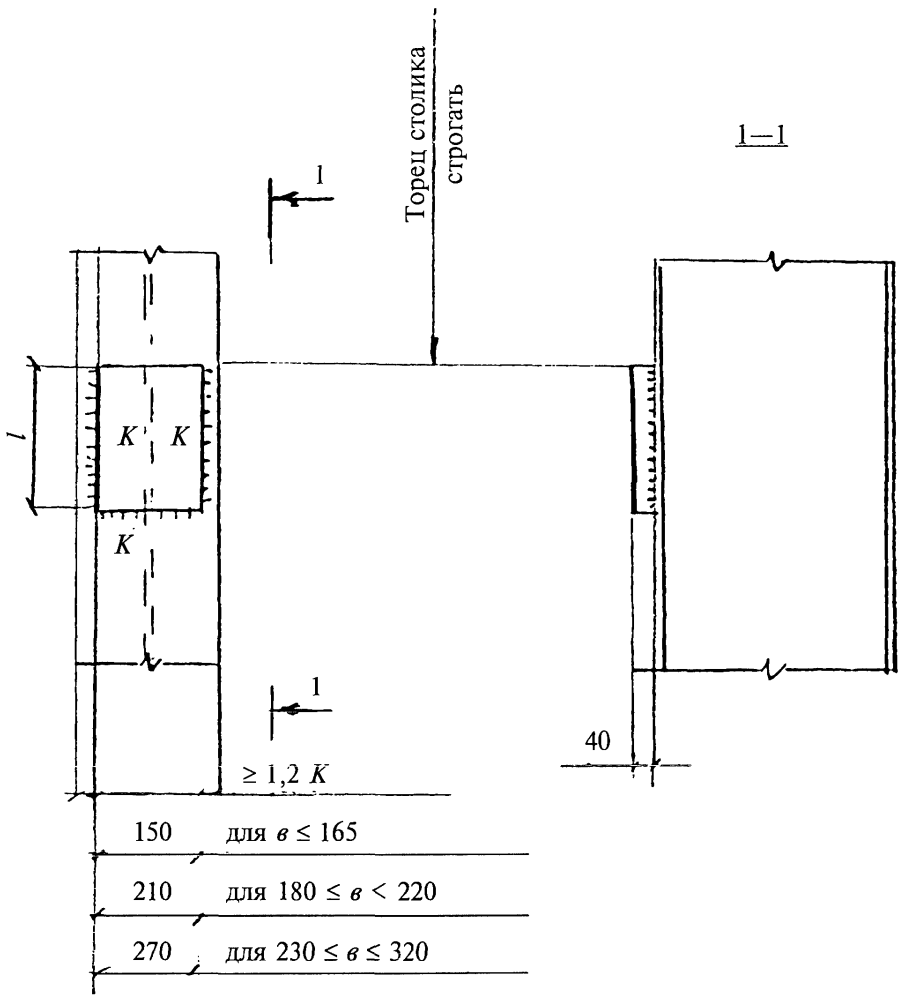
2.7. Диаметры отверстий для болтов М16 приняты 19 мм, для болтов М20 — 23 мм, для болтов М24 — 28 мм, для болтов М27 — 30 мм.

2.8. Конструкция и геометрические размеры опорных столиков показаны на рис. 3, катеты сварных швов, прикрепляющих опорные столики в полке колонны, приведены в табл. 1. Материал опорных столиков — сталь 09Г2С-12.

Таблица 1

Характеристики опорных столиков

K, мм	Предельные усилия, воспринимаемые опорными столиками, в кН при *l* в мм							
	200	300	400	500	600	700	800	900
8	383	584	785					
10		650	874	11100	1320			
12			1050	1320	1590	1850		
14				1350	1620	1900	2170	
16					1850	2160	2480	2790



Материал опорных столиков — сталь 09Г2С-12
в — ширина полки примыкающего ригеля.

Рис. 3. Конструкция и геометрические размеры опорных столиков

2.9. Требования к материалу фланцев, к изготовлению и монтажной сборке фланцевых соединений должны соответствовать изложенным в [3].

3. ОСНОВНЫЕ РАСЧЕТНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

3.1. Нормативные и расчетные сопротивления сталей балок, колонн, фланцев, болтов, сварных швов и коэффициенты условий работы приняты в соответствии с требованиями [4].

3.2. Расчетное усилие растяжения $B_р$ болтов фланцевых соединений в соответствии с [4] принято равным

$$B_р = R_{bh} A_{bn},$$

где $R_{bh} = 0,7R_{bun}$ — расчетное сопротивление растяжению высокопрочных болтов;

R_{bun} — нормативное сопротивление стали болтов;

A_{bn} — площадь сечения болта «нетто».

3.3. Расчетное усилие контролируемого предварительного натяжения B_0 болтов фланцевого соединения принято равным

$$B_0 = 0,9B_р - 0,63R_{bun} A_{bn}.$$

3.4. Расчет прочности узлов произведен в соответствии с требованиями [4].

3.5. Методика всех расчетов детально изложена в разделе 2.

4. ОПИСАНИЕ ПРОГРАММЫ «FLANEC» ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОЧИХ ЧЕРТЕЖЕЙ КМ

4.1. Программа «FLANEC» предназначена для выполнения рабочих чертежей КМ рамных фланцевых соединений выбранных конструктивных форм с необходимой информацией о прочностных, жесткостных и

деформационных характеристиках соединений и нагрузках, воспринимаемых балочными конструкциями.

4.2. Для запуска программы в работу необходимо воспользоваться файлом «RSTART.BAT» при наличии DOS 5,0 или файлом «RSTART3.BAT» при наличии DOS 3,0, расположенных в директории «FLANEC\R».

4.3. В файле «FLANEC.CFG» необходимо установить букву, соответствующую жесткому диску, на котором создана директория «FLANEC\R».

4.4. Исходными данными программы являются:

- российские или европейские профили колонн и возможные для выбранного профиля колонны профили балок (характеристики в [см], [$см^2$], [$см^3$], [$см^4$] российских профилей приведены в файле «R_SSORT.DBF», европейских профилей в файле «ESORT.DBF»);

- стали колонн и балок (характеристики в [$кгс/см^2$] российских сталей приведены в файле «R_STEEL.DBF», характеристики европейских сталей взяты по данным EUROCODE-3);

- типы фланцев, возможные для выбранного профиля ригеля;

геометрические параметры фланцев приняты в соответствии с указаниями [3];

- толщина фланцев в [см];

- толщина горизонтального и наклонного ребер жесткости колонны в [см];

- толщина обратной накладки в [см];

- длина ригеля в [м];

- диаметр болтов в [мм]: 27, 24, 20 или 16 мм;

- класс прочности болтов: высокопрочные, 10,9 и 8,8;

- наличие или отсутствие предварительного натяжения болтов;

- коэффициент формы кривой для построения зависимости «момент — угол поворота» по формуле

$$M = K\alpha / [1 + (1 + (K\alpha/M_и)^n]^{1/n},$$

где M и α — соответственно момент и угол поворота;

K — начальная жесткость узла;

$M_и$ — предельный изгибающий момент, воспринимаемый узлом;

$n = 1{,}8$ — коэффициент формы кривой;

— коэффициент условий работы конструкции.

4.5. Результатам работы программы являются:

- рабочие чертежи КМ, выполненные в псевдографическом режиме, выбранных типов фланцевых соединений балок с колоннами с необходимой информацией о колонне, балке, фланце, болтах и сварных швах;

- значения начальных жесткостей, предельных моментов и координат точек зависимостей «момент — угол поворота» для узла в целом и отдельно для частей узлов, работающих на сдвиг и растяжение, сжатие, изгиб;

- характерные точки для построения балочной линии для условий постоянного уровня напряжений текучести в балке (момент и угол поворота);

- значения опорного момента и угла поворота опорного сечения балки при предельной нагрузке, воспринимаемой балкой;

- значение предельной равномерно распределенной нагрузки, которая может быть воспринята балкой с выбранным соединением;

- значение приведенной нагрузки, показывающей во сколько раз предельная нагрузка, воспринимаемая балкой с выбранным соединением, больше предельной нагрузки, воспринимаемой балкой с чисто шарнирным соединением.

Имеется возможность, не выходя из программы, просмотреть для узла в целом и отдельно для частей узлов, работающих на сдвиг и растяжение, сжатие, изгиб, графики общего вида зависимостей «момент — угол поворота», графики зависимостей «момент — угол поворота» вместе с балочной линией и графики зависимостей «момент — угол поворота» в безразмерных координатах:

$$1.\ M/M_{p1} - \alpha\, EI/(M_{p1}\, L);$$

$$2.\ M/M_{p1} - \alpha\, EI/(M_{p1}\, H),$$

где M и α — соответственно момент и угол поворота;

M_{p1} — пластический момент сечения балки;

EI — изгибная жесткость балки;

L — пролет балки;

H — высота балки.

В первом случае предусмотрена классификация соединений по EUROCODE-3, во втором случае — классификация соединений в соответствии с предложениями Инсбрукского университета и BJORHOVDE, BROZZETTI, COLSON.

Просмотренные графики записываются в файлы с расширением «CGR» (последний график каждого вида).

Результаты расчета заносятся в директорию «FLANEC\RES» в файлы типа «EX_III.RES». Знаком «*» отмечены значения расчетных моментов, воспринимаемых болтами. Нумерация файлов производится автоматически последовательно по мере проведения расчетов.

5. ПРИМЕР РАСЧЕТА ФЛАНЦЕВОГО СОЕДИНЕНИЯ РИГЕЛЯ 40Б1 С КОЛОННОЙ 23К1

Колонна				
Профиль	Сталь	Ребро горизонт.	Ребро наклонное	Накладка
23К1	С345-3	1,0	1,0	1,0

Ригель			Фланец	
Профиль	Сталь	Длина	Тип	Толщина
40Б1	С345-3	6	1	2,0

Болты		
Диаметр	Класс прочности	Преднатяжение
М24	Высокопрочные	Есть

Коэффициент условий работы конструкции — 0,90

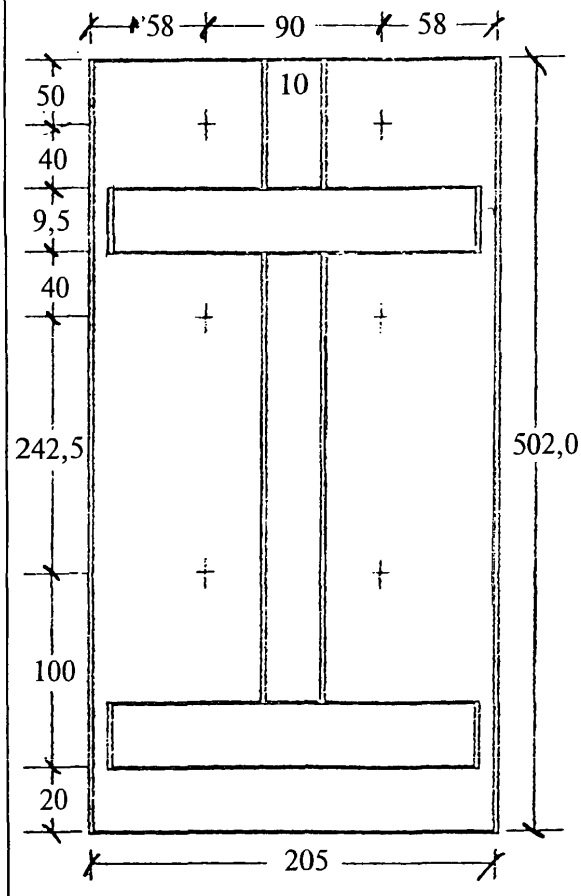
Сварные швы

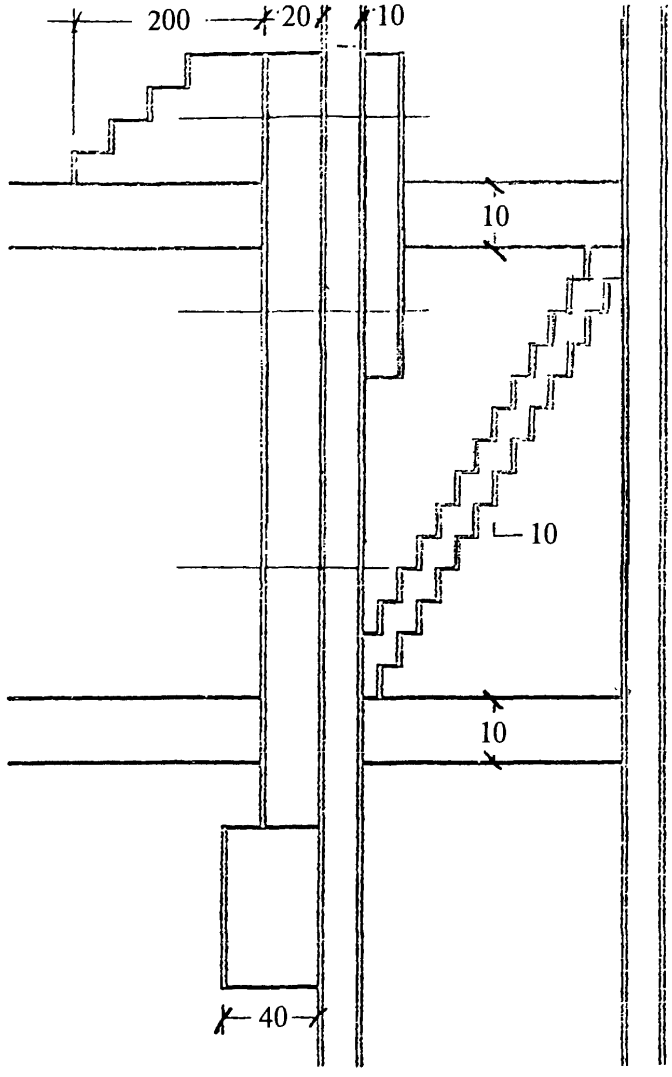
Прикрепление фланца:
- к стенке ригеля — K = 8
- к растянутой полке ригеля — K = 10
- к сжатой полке ригеля — швы с полным проваром

Прикрепление ребра жесткости фланца — K = 8 мм

Прикрепление обратной накладки к полке колонны — K = 8 мм

Прикрепление ребра жесткости:
- к стенке колонны — K = 8
- к полке колонны — швы с полным проваром


58
90
58
10
50
40
9,5
40
242,5
100
20
502,0
205


200
20
10
10
10
10
40

СДВИГ

Начальная жесткость узла — кН·м/рад	88610,821
Предельный момент, воспринимаемый узлом, — кН·м	647,103

РАСТЯЖЕНИЕ, СЖАТИЕ, ИЗГИБ

Начальная жесткость узла — кН·м/рад		256410,256
Предельные моменты, воспринимаемые элементами узла, — кН·м		
Болты	487,263	
Фланец	1590,359	
Полка колонны	841,516	
Стенка колонны (растяжение)	476,596	
Стенка колонны (сжатие)	389,305	
Предельный момент, воспринимаемый узлом, — кН·м		432,562
Расчетный момент, воспринимаемый болтами, — кН·м		341,084

УЗЕЛ В ЦЕЛОМ

Начальная жесткость узла — кН·м/рад	65853,146
Предельный момент, воспринимаемый узлом, — кН·м	432,562
Расчетный момент, воспринимаемый болтами, — кН·м	341,084

Зависимость «Момент — угол поворота»

Коэффициент формы кривой — 1,8

Угол поворота, рад	Моменты, кН·м		
	Сдвиг	Растяжение, сжатие, изгиб	Узел в целом
0,0000	0,00	0,00	0,00
0,0005	44,14	120,86	32,75
0,0010	87,49	213,53	64,65
0,0015	129,51	276,66	95,13
0,0020	169,77	318,38	123,82
0,0024	—	341,08*	—
0,0030	244,00	365,41	174,99
0,0040	309,03	388,85	217,68
0,0050	364,87	401,91	252,55
0,0060	412,24	409,86	280,77
0,0070	452,16	415,05	303,55
0,0080	485,73	418,63	321,99
0,0090	513,98	421,19	337,00
0,0093	—	—	341,08*
0,0100	537,81	423,10	349,31
0,0110	557,99	424,55	359,48
0,0120	575,17	425,69	367,95
0,0130	589,87	426,59	375,07
0,0140	602,50	427,32	381,10
0,0150	613,43	427,93	386,23
0,0160	622,92	428,43	390,64
0,0170	631,22	428,85	394,45
0,0180	638,50	429,21	397,77
0,0190	644,92	429,52	400,67
0,0200	650,60	429,78	403,22
0,0210	655,66	430,01	405,48
0,0220	660,18	430,22	407,48
0,0230	664,23	430,40	409,26
0,0240	667,88	430,56	410,86
0,0250	671,17	430,70	412,30
0,0260	674,15	430,82	413,60
0,0270	676,86	430,94	414,77
0,0280	679,32	431,04	415,84
0,0290	681,58	431,13	416,81
0,0300	683,64	431,22	417,70
0,0310	685,54	431,29	418,51
0,0320	687,28	431,36	419,26
0,0330	688,89	431,43	419,95
0,0340	690,38	431,49	420,58
0,0350	691,76	431,54	421,17

Характеристики	Растяжение, сжатие, изгиб	Узел в целом
Балочная линия:		
- момент, кН·м	306,01	306,01
- угол поворота, рад	0,0185	0,0185
Опорный момент, кН·м	306,01	306,01
Угол поворота опорного сечения, рад	0,0018	0,0071
Распред. нагрузка, кН/м	108,73	128,18
Приведенная нагрузка	1,60	1,88

6. ПРИМЕР РАСЧЕТА ФЛАНЦЕВОГО СОЕДИНЕНИЯ РИГЕЛЯ 80Б1 С КОЛОННОЙ 40К1

Колонна				
Профиль	Сталь	Ребро горизонт.	Ребро наклонное	Накладка
40К1	С345-3	2,0	2,0	2,0

Ригель			Фланец	
Профиль	Сталь	Длина	Тип	Толщина
80Б1	С345-3	9	7	2,5

Болты		
Диаметр	Класс прочности	Преднатяжение
М24	Высокопрочные	Есть

Коэффициент условий работы конструкции — 0,90

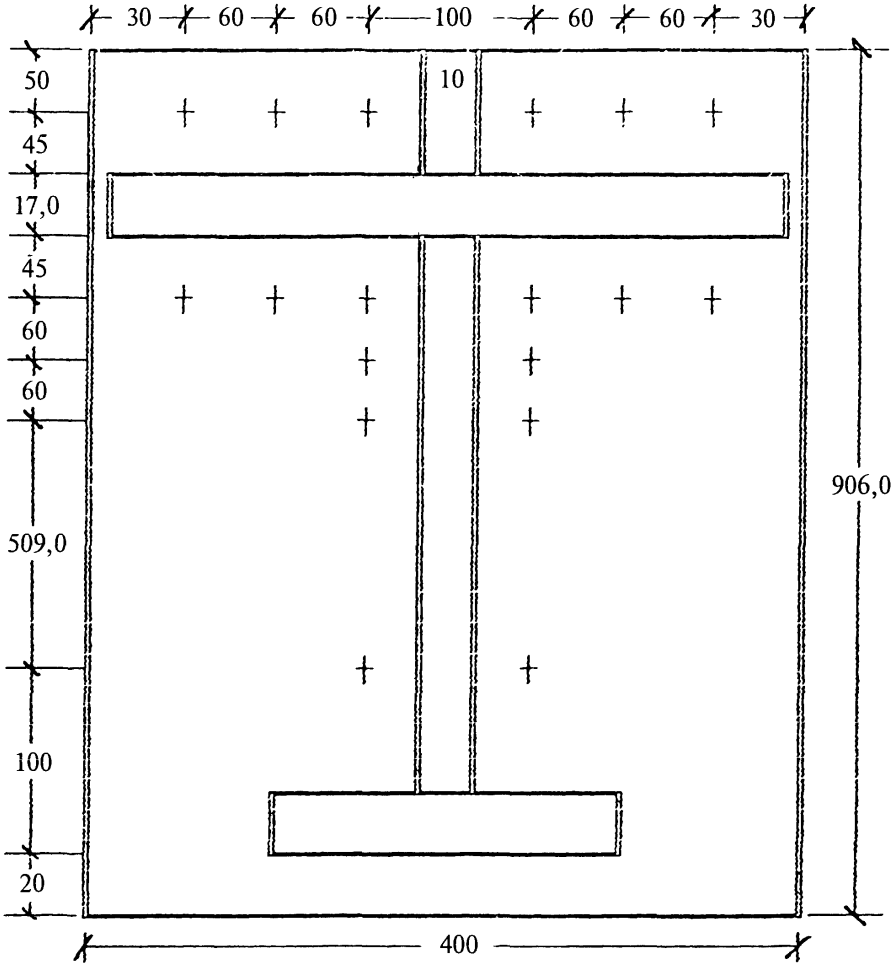
Сварные швы

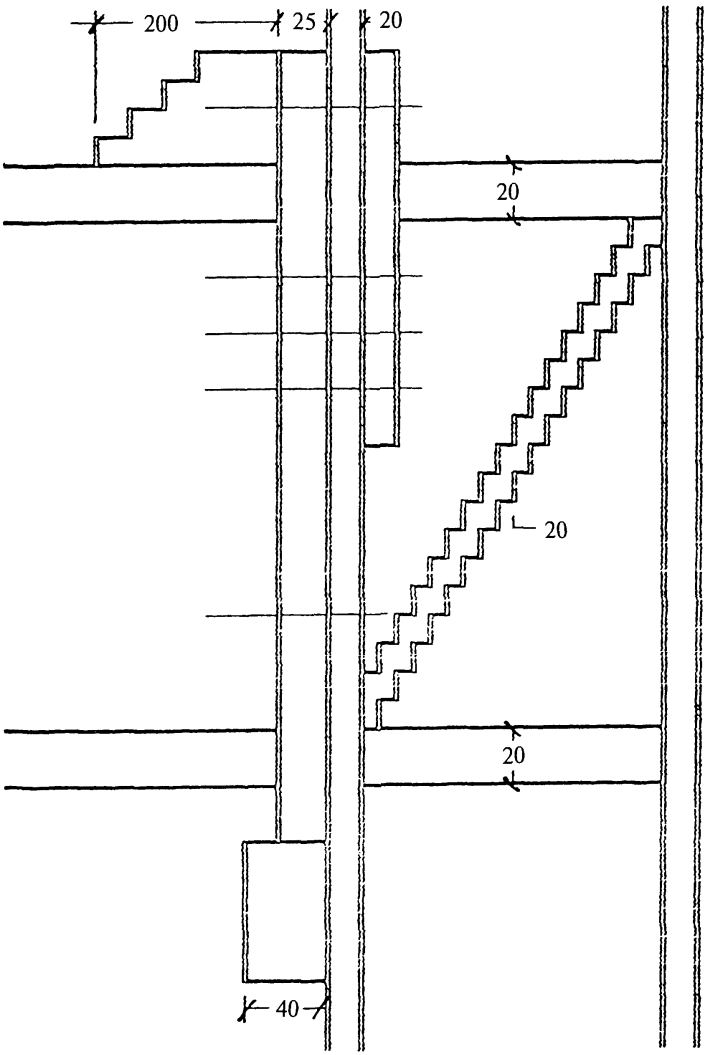
Прикрепление фланца:
- к стенке ригеля — К = 14
- к растянутой полке ригеля — К = 16
- к сжатой полке ригеля — швы с полным проваром

Прикрепление ребра жесткости фланца — К = 8 мм

Прикрепление обратной накладки к полке колонны — К = 8 мм

Прикрепление ребра жесткости:
- к стенке колонны — К = 10
- к полке колонны — швы с полным проваром


30
60
60
100
60
60
30
50
45
17,0
45
60
60
509,0
100
20
10
906,0
400


200
25
20
20
20
20
40

СДВИГ

Начальная жесткость узла — кН·м/рад	487841,773
Предельный момент, воспринимаемый узлом, — кН·м	4610,228

РАСТЯЖЕНИЕ, СЖАТИЕ, ИЗГИБ

Начальная жесткость узла — кН·м/рад		1052631,579
Предельный момент, воспринимаемый элементами узла, — кН·м		
Болты	2638,492	
Фланец	6956,094	
Полка колонны	9787,548	
Стенка колонны (растяжение)	2953,160	
Стенка колонны (сжатие)	2370,558	
Предельный момент, воспринимаемый узлом, — кН·м		2633,953
Расчетный момент, воспринимаемый болтами, — кН·м		1846,944

УЗЕЛ В ЦЕЛОМ

Начальная жесткость узла — кН·м/рад	333350,561
Предельный момент, воспринимаемый узлом, — кН·м	2633,953
Расчетный момент, воспринимаемый болтами, — кН·м	1846,944

Зависимость «Момент — угол поворота»

Коэффициент формы кривой — 1,8

Угол поворота, рад	Моменты, кН·м		
	Сдвиг	Растяжение, сжатие, изгиб	Узел в целом
0,0000	0,00	0,00	0,00
0,0005	243,36	510,86	166,03
0,0010	483,95	954,83	328,95
0,0015	719,80	1310,74	486,59
0,0020	949,32	1584,33	637,38
0,0027		1846,94*	
0,0030	1384,64	1947,88	914,37
0,0040	1783,29	2159,44	1155,69
0,0050	2142,45	2288,82	1361,73
0,0060	2462,20	2372,36	1535,54
0,0070	2744,52	2429,01	1681,26
0,0080	2992,47	2469,03	1803,21
0,0084			1846,94*
0,0090	3209,57	2498,30	1905,39
0,0100	3399,44	2520,34	1991,29
0,0110	3565,54	2537,34	2063,81
0,0120	3711,02	2550,73	2125,36
0,0130	3838,69	2561,47	2177,87
0,0140	3951,01	2570,22	2222,94
0,0150	4050,09	2577,44	2261,82
0,0160	4137,76	2583,47	2295,56
0,0170	4215,59	2588,56	2324,99
0,0180	4284,89	2592,91	2350,79
0,0190	4346,79	2596,64	2373,51
0,0200	4402,26	2599,87	2393,62
0,0210	4452,13	2602,69	2411,50
0,0220	4497,08	2605,16	2427,45
0,0230	4537,73	2607,34	2441,74
0,0240	4574,59	2609,28	2454,59
0,0250	4608,10	2611,01	2466,18
0,0260	4638,64	2612,55	2476,68
0,0270	4666,56	2613,94	2486,21
0,0280	4692,13	2615,20	2494,89
0,0290	4715,61	2616,34	2502,81
0,0300	4737,21	2617,37	2510,07
0,0310	4757,13	2618,31	2516,74
0,0320	4775,53	2619,17	2522,87
0,0330	4792,57	2619,96	2528,52
0,0340	4808,37	2620,69	2533,75
0,0350	4823,06	2621,36	2538,58

Характеристики	Растяжение, сжатие, изгиб	Узел в целом
Балочная линия:		
- момент, кН·М	1807,77	1807,77
- угол поворота, рад	0,0129	0,0129
Опорный момент, кН·м	1807,77	1674,17
Угол поворота опорного сечения, рад	0,0025	0,0070
Распред. нагрузка, кН/м	302,92	343,90
Приведенная нагрузка	1,70	1,93

РАЗДЕЛ 2. МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПРОЧНОСТИ, ЖЕСТКОСТИ И ДЕФОРМАТИВНОСТИ РАМНЫХ ФЛАНЦЕВЫХ СОЕДИНЕНИЙ

1. ДИАГРАММА «МОМЕНТ — УГОЛ ПОВОРОТА» И ОСОБЕННОСТИ ПОВЕДЕНИЯ СОЕДИНЕНИЙ В БАЛОЧНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ

Для характеристики поведения соединений принято использовать зависимость между моментом M, воспринимаемым соединением, и углом поворота сечения α (кривые А; Б; В рис. 1.1), которая описывает всю совокупность свойств соединения — его прочность, деформативность и изгибную жесткость.

Прочность — способность соединения воспринимать внешние усилия. В данном случае условимся понимать под прочностью рамного фланцевого соединения способность воспринимать изгибающий момент.

Деформативность — способность опорного сечения поворачиваться под действием момента. Количественно измеряется углом поворота сечения α. Изгибная жесткость — тангенс угла наклона касательной к кривой «M — α» в определенной точке. Тангенс угла наклона касательной к диаграмме «M — α» при $\alpha = 0$ называется начальной жесткостью соединения K.

Соединения А и Б в предельном состоянии (обрыв зависимостей «M — α») являются равнопрочными, т.к. способны передавать одинаковый момент. Но при этом соединение Б является более деформативным, так как при одной и той же величине передаваемого момента имеет большее значение угла поворота. Соединение В в предельном состоянии имеет одинаковую с соединением А деформативность (α), при существенно меньшей прочности ($M_в$).

Максимальной жесткостью обладает соединение А, минимальной — соединение В. На рис. 1.1 это выражается в последовательном расположении кривых (M — α) от В к А.

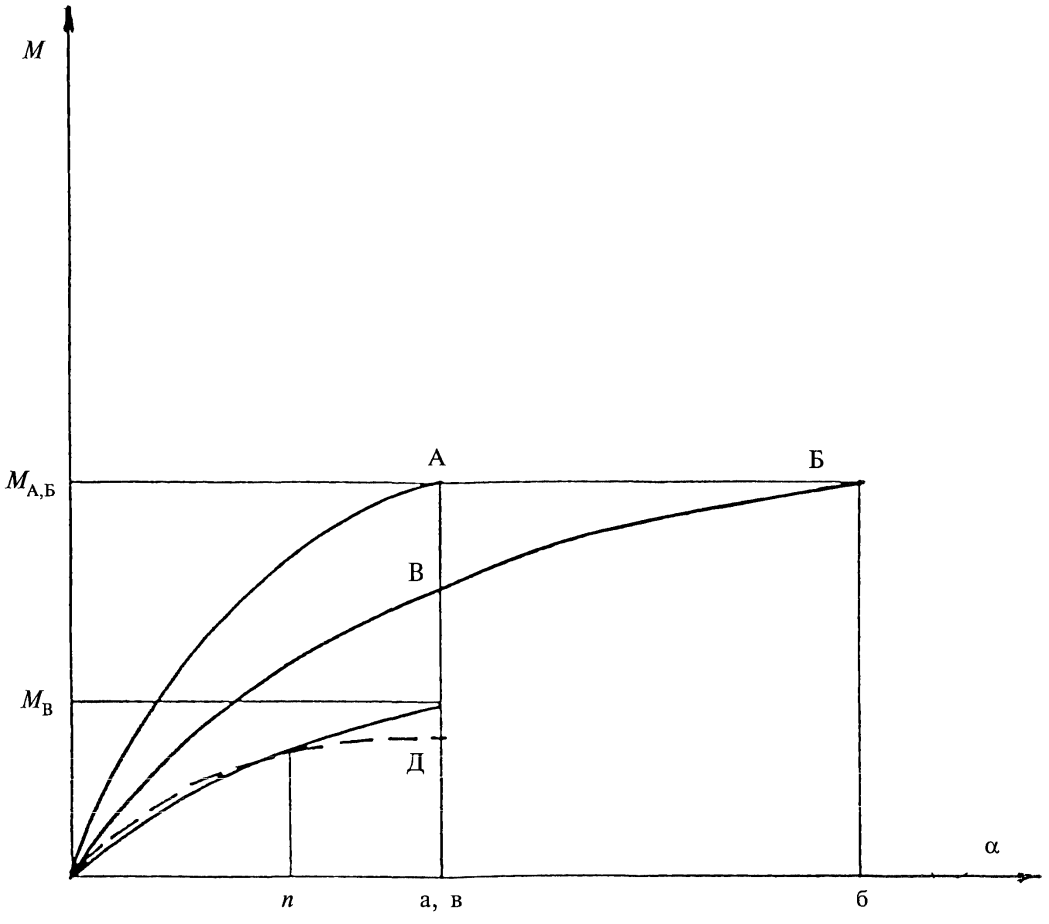
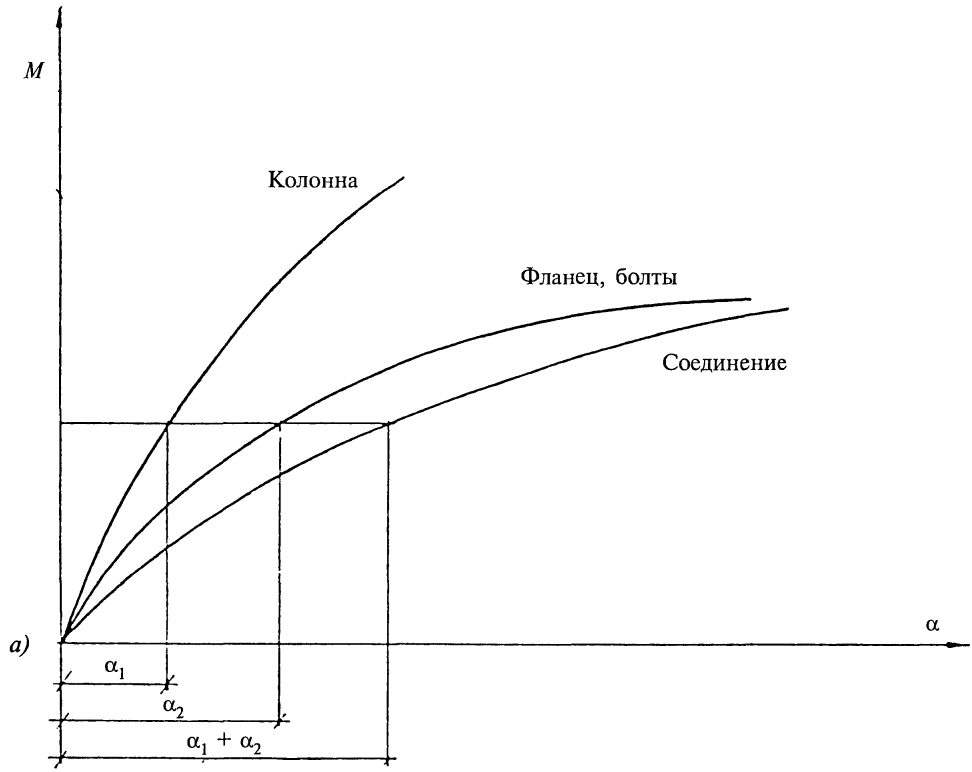


Рис. 1.1. Диаграмма «момент — угол поворота» соединений различной конструктивной формы

Обычно зависимость «M — α» характеризует жесткость всех элементов, составляющих соединение. Поэтому условно зависимость «M — α» можно представить как сумму зависимостей, характеризующих работу отдельных элементов узла. На рис. 1.2 показаны диаграммы «M — α» фланцевого соединения (ФС) с идеально жесткой опорной частью и отдельно — опорной части реальной колонны, которые вместе дают диаграмму «M — α» всего соединения. В одном случае деформативность опорной части колонны меньше деформативности фланцев и болтов (рис. 1.2, *а*), в другом — значительно больше и ее вклад определяет деформативность соединения в целом (рис. 1.2, *б*). Поскольку для фланцевых соединений, как свидетельствует большое число исследований, вклад всей опорной части колонны в деформативность и прочность конструкции весьма велик, то под термином «фланцевое соединение» условимся считать ответную часть колонны, болты и фланец.

Оценку величин опорных моментов и углов поворота конкретной балки с конкретным соединением, для которого известна зависимость «M — α», удобно осуществлять с помощью балочной линии.

Балочная линия является характеристикой собственно балки и выражает соотношение между опорным моментом M и поворотом.



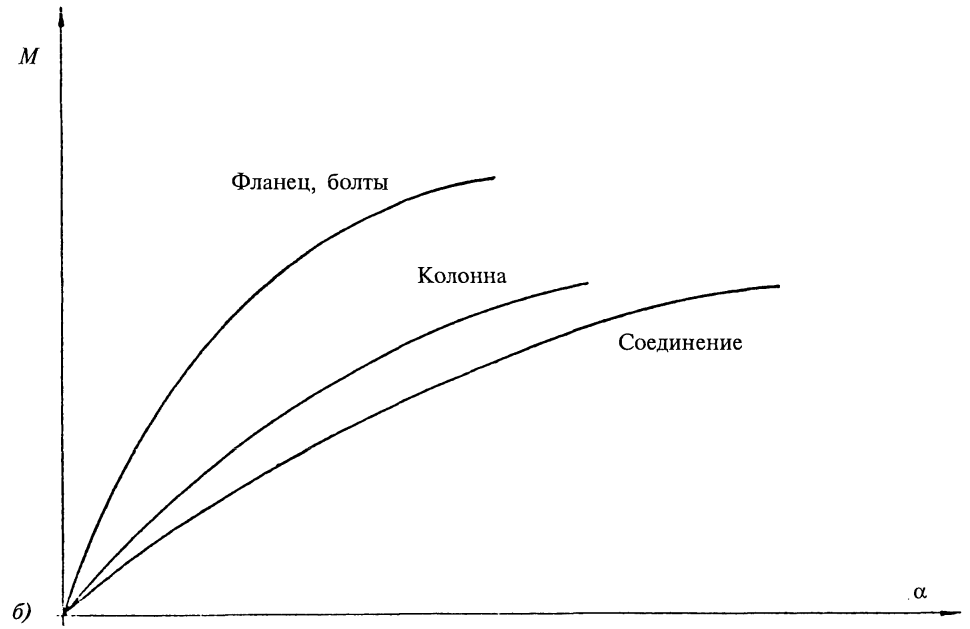


Рис. 1.2. Вклад опорной части колонны в деформативность изгибаемого фланцевого соединения

Крайние точки балочной линии, расположенные на осях ординат и абсцисс, соответствуют абсолютно жесткому защемлению и чисто шарнирному опиранию. Координаты крайних точек:

при жесткой заделке

$$M_0 = \frac{qL^2}{12}; \quad \alpha_0 = 0; \tag{1.1}$$

при шарнирном опирании

$$M_0 = 0; \quad \alpha_0 = \frac{qL^3}{24EI}. \tag{1.2}$$

Поскольку при работе балочной конструкции происходит совместный поворот соединения и балочного конца, то координаты точки пересечения кривой «$M - \alpha$» с балочной линией есть величина момента и угла поворота на опорах.

Для шарнирно опертой балки максимальная нагрузка из условия появления текучести в середине пролета определяется:

$$q_{yc} = 8M_y / L^2, \tag{1.3}$$

где M_y — изгибающий момент, при котором достигается начало текучести;

$$M_y = \sigma_y W, \tag{1.4}$$

где σ_y — предел текучести стали;
W — момент сопротивления балки.

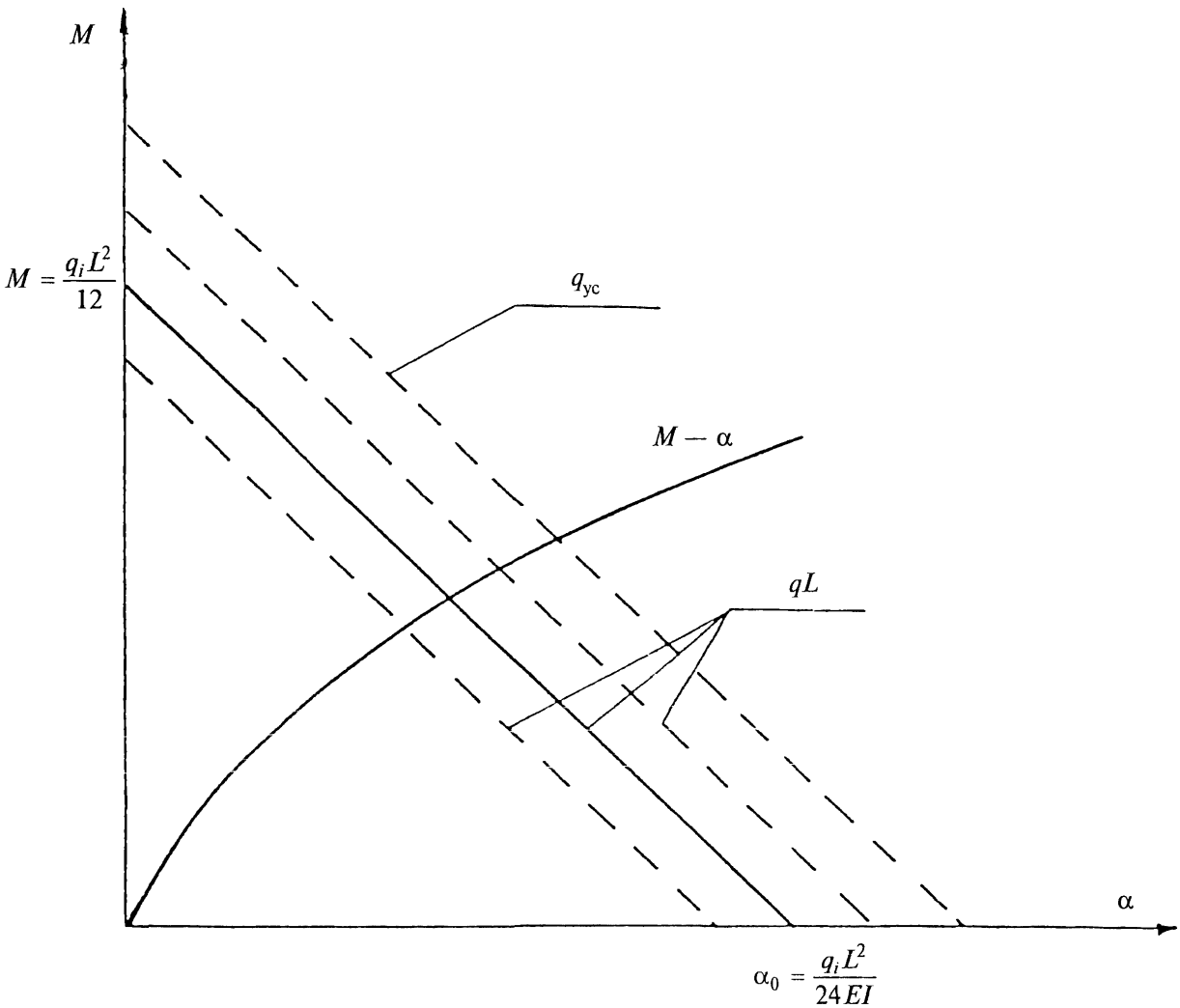


Рис. 1.3. Кривая «M — α» соединения и балочная линия для постоянной нагрузки

Для другого случая при жестко защемленных концах текучесть сначала возникает у опор при нагрузке

$$q_{ye} = 12M_y/L^2, \tag{1.5}$$

т.е. $q_{ye} \neq q_{yc}$. Для текучести у опор требуется нагрузка в 1,5 раза большая, чем для текучести в пролете.

Обратимся к рис. 1.4. Балочные линии, построенные из условия постоянного уровня напряжений (сплошная линия) и условия постоянной предельной нагрузки (пунктирная линия), имеют одну общую точку R. При шарнирном опирании q_{yc} является предельной, и, следовательно, в балке присутствуют максимальные напряжения.

Участок RQ соответствует диапазону жесткостей защемлений балочных концов, при котором первая текучесть возникает в пролетном сечении балки. С увеличением жесткости защемления угол поворота опорного сечения изменяется от α_0 (в т.P) до $\alpha_0/2$ (в т. Q), предельная нагрузка при этом увеличивается от 8 M_y/L до 16 M_y/L_2.

Выражение балочной линии для участка RQ имеет вид:

$$M = 2M_y - \alpha\frac{6EI}{L}. \tag{1.6}$$

Горизонтальный участок балочной линии PQ соответствует жесткостям защемлений балочных концов, при которых первая текучесть возникает на опорах.

Для данного диапазона жесткостей балочная линия параллельна оси абсцисс.

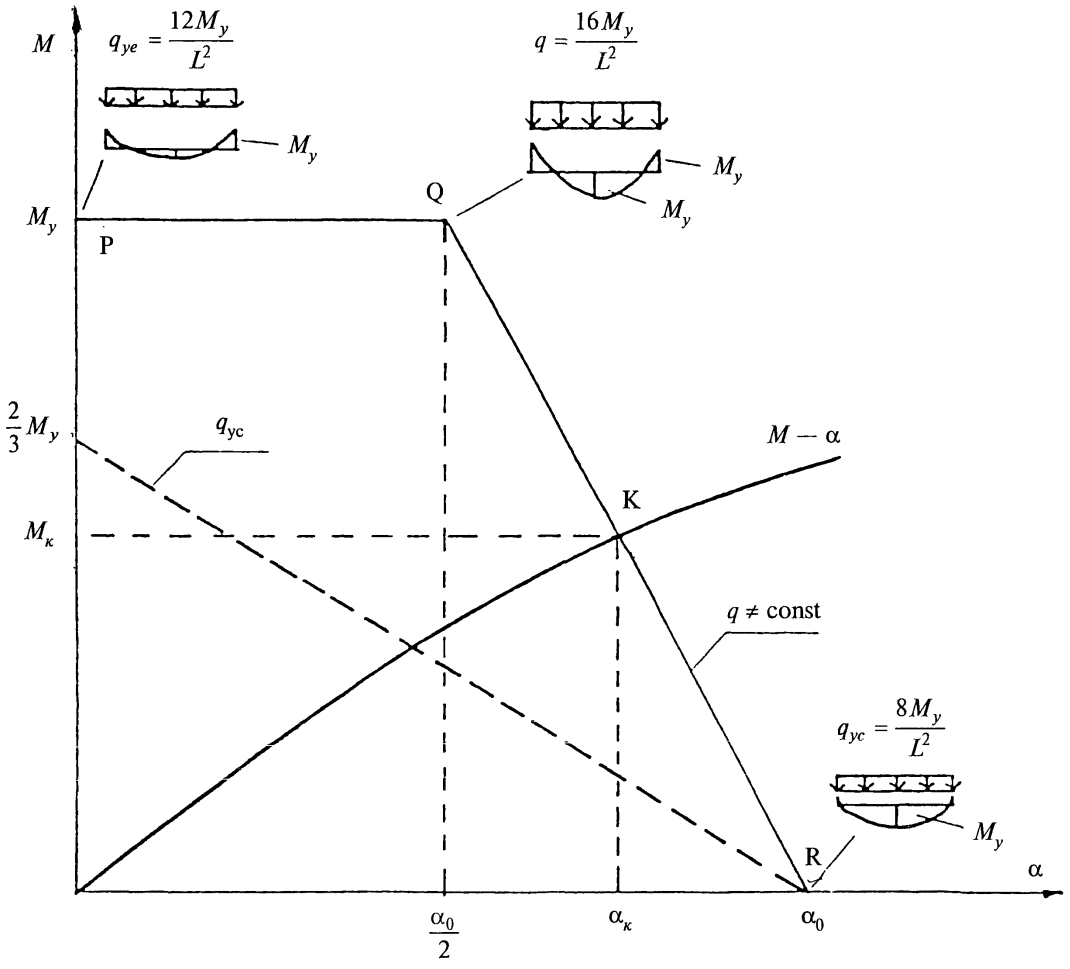


Рис. 1.4. Кривая «$M - \alpha$» соединения и балочная линия PQR, соответствующая постоянному уровню напряжений текучести

При жесткой заделке (т. P) предельная нагрузка составляет $13M_y/1$. Величина момента на опоре, соответствующая максимальному уровню напряжений, равна M_y. Так как на всем участке PQ определяющими сечениями, где появляется первая текучесть, являются опорные, то следовательно величина опорного момента должна быть постоянной, максимальной и равной M_y. Поэтому с увеличением податливости защемления, сопровождающегося ростом угла поворота опорного конца балки от нуля (т. P) до $\alpha/2$ (т. Q) предельная нагрузка увеличивается до значения $16\ M_y/L^2$.

Выражение для балочной линии на участке PQ можно записать в виде $M = M_y$.

Из рассмотрения обоих участков линии видно, что оптимальным защемлением является такое (т. Q), при котором опорные и пролетные величины моментов равны, а нагрузка, воспринимаемая балкой, максимальна.

Точка пересечения кривой $M - \alpha$, характеризующей работу соединения, с балочной линией определяет значение опорного момента и угла поворота балочной конструкции.

Построение балочных линий, как видно, не представляет особых трудностей. Таким образом, проведенный анализ показал, что ключевой задачей для расчета конструкций с учетом действительного поведения соединения является умение определять зависимость «$M - \alpha$».

2. РАЗРАБОТКА ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РАБОТЫ ИЗГИБАЕМЫХ ФЛАНЦЕВЫХ СОЕДИНЕНИЙ

2.1. МОДЕЛЬ ПОВЕДЕНИЯ ФЛАНЦЕВОГО СОЕДИНЕНИЯ НА ИЗГИБ

На основании анализа результатов исследований рамных фланцевых соединений стальных строительных конструкций, приведенного в первом разделе, для описания поведения соединения на изгиб предлагаем формулу:

$$M = K\alpha \frac{1}{\left(1 + (K\alpha / M_{и})^{n}\right)^{\frac{1}{n}}}, \qquad (2.1)$$

где M — момент, приложенный к соединению;

α — угол поворота между линиями соединяемых элементов в точке пересечения (угол поворота соединения), рис. 2.1;

K — начальная жесткость соединения;

$M_{и}$ — предельный изгибающий момент, воспринимаемый соединением;

n — коэффициент формы кривой.

Таким образом, для описания действительного поведения фланцевого соединения требуется получить параметры формулы (2.1) — K, $M_{и}$ и n.

2.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ НАЧАЛЬНОЙ ЖЕСТКОСТИ СОЕДИНЕНИЯ

Участок стенки колонны не подвержен сдвигу

Рассмотрим поведение рамного фланцевого соединения ригелей с колонной внутреннего ряда каркаса, когда с обеих сторон опорной части колонны приложены изгибающие моменты одной и той же величины.

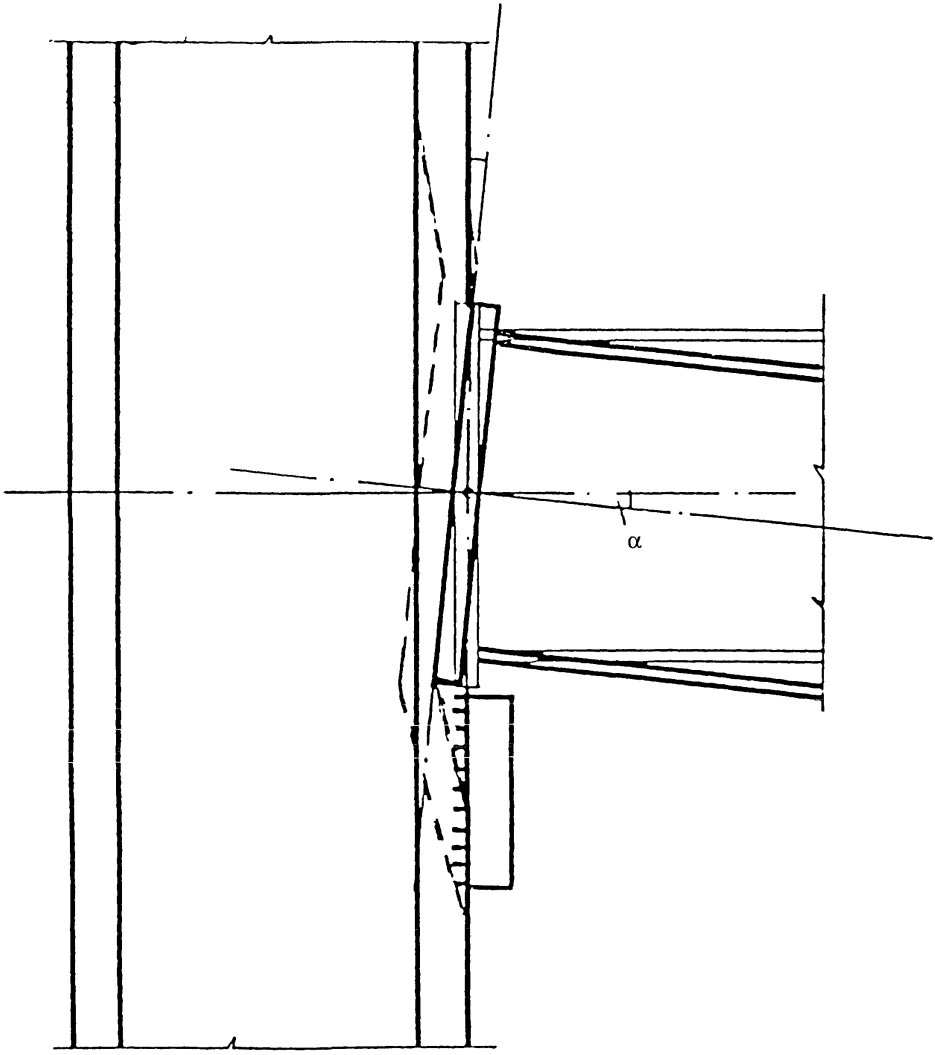


Рис. 2.1. Угол поворота фланцевого соединения

Для расчета действительной начальной жесткости ФС ригелей с колоннами используем разработанную во ВНИПИ Промстальконструкции программу «Флора». В соответствии с ней модель работы колонны и фланца предлагается такой, как показано на рис. 2.2.

Программа учитывает:

- упругое поведение болтов, фланцев, а также полки, стенки и ребер жесткости;

- особенности контактного взаимодействия фланца с полкой колонны в процессе нагружения;

- геометрическую нелинейность при совместном действии на колонну изгиба и сжатия.

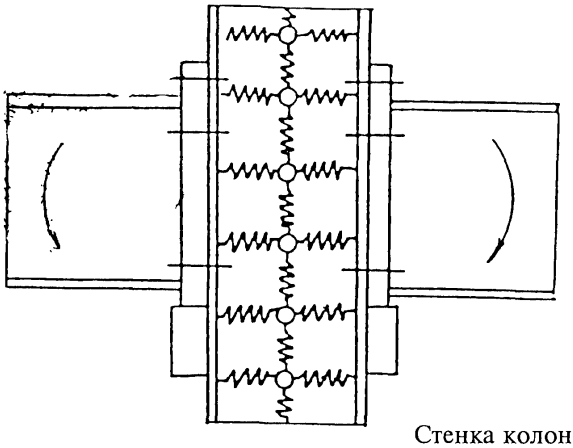
Результатами работы программы «Флора» кроме величины начальной жесткости являются:

- значения нормальных и касательных напряжений, перемещений по направлениям X; Y и углов поворота вокруг осей X и Y в каждом узле сетки конечных элементов;

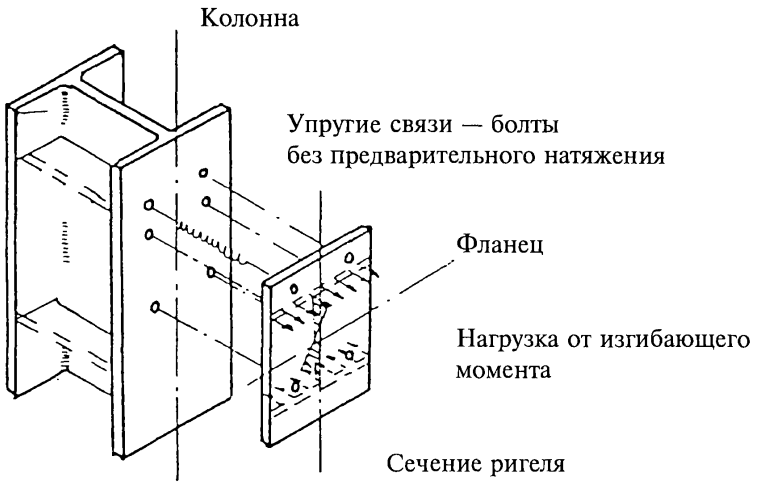
- значения внутренних усилий в болтах;

- зависимость «момент — угол поворота» в табличной и графических формах в геометрической линейной и нелинейной постановках.

Программа «Флора» дает возможность изучить упругую прочность и деформативность как всего соединения в целом, так и отдельно составляющих его элементов (фланца, болтов, полок, стенки, ребер жесткости колонны), влияние на общую деформативность соединения всех его конструктивных элементов.



Стенка колонны — упругие связи
по линии соединения полки
со стенкой



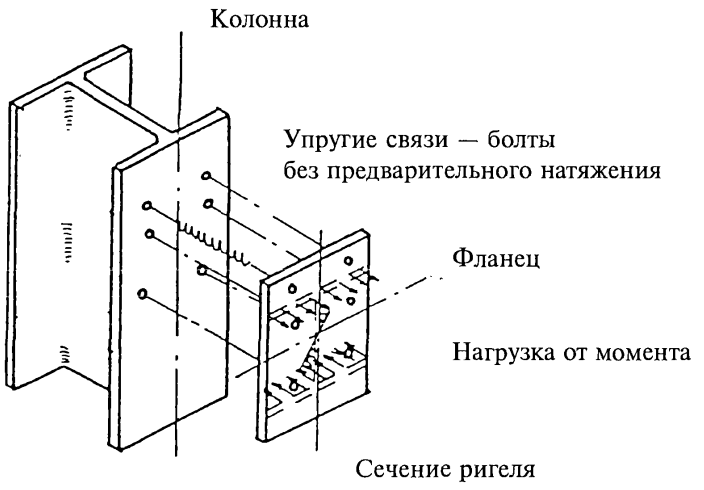


Рис. 2.2. Модель работы фланцевых соединений ригелей с колоннами
для расчета начальной жесткости

Участок стенки колонны подвержен сдвигу

В качестве расчетной модели работы стенки колонны на сдвиг примем схему. В соответствии с ней усилия сдвига воспринимаются прямоугольными участками стенки колонны со сторонами, равными высоте профиля примыкающей балки и профиля колонны (рис. 2.3). Коэффициент влияния примыкающих участков стенки колонны и полок принимаем равным 1,0.

При расчете участка колонны введем допущение (в запас прочности), что стенка колонны и диагональное ребро работают отдельно. Предполагаем, что на участок стенки действует усилие F_1, а на систему полки колонны — горизонтальные ребра жесткости — диагональные ребра жесткости, рассматриваемую как стержневая система с шарнирными узлами, действует усилие F_2. При этом имеем:

$$F = F_1 + F_2, \text{ а также} \tag{2.2}$$

$$\Delta_c = \Delta_1 = \Delta_2. \tag{2.3}$$

Запишем выражение для деформаций участка стенки:

$$\Delta_1 = \frac{F_1(h_б - t_б)}{Gh_к S_к}. \tag{2.4}$$

Принимая во внимание, что

$$\alpha = \frac{\Delta_c}{h - t}; \tag{2.5}$$

$$M = F(h_б - t_б) \tag{2.6}$$

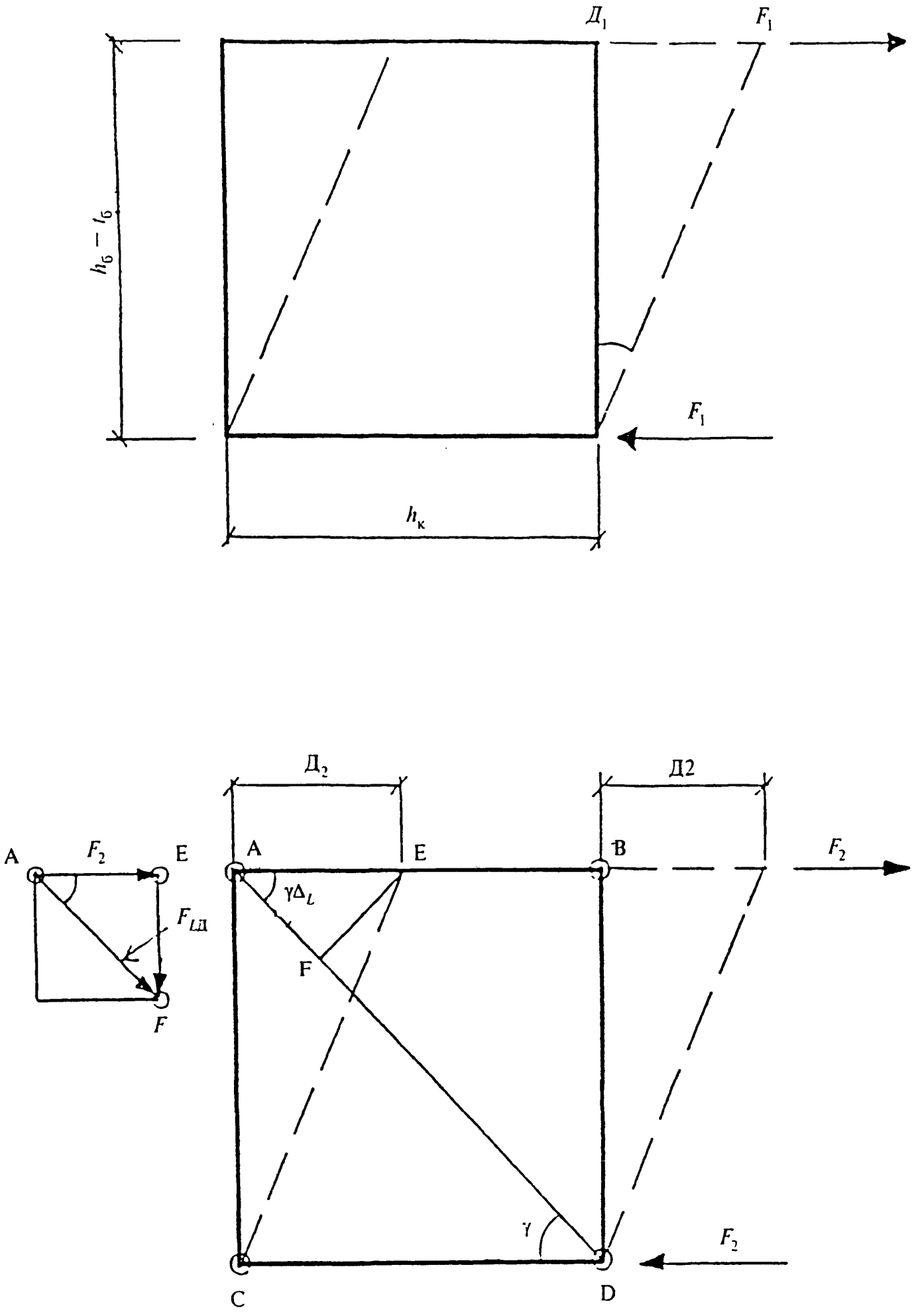


Рис. 2.3. Расчетная схема участка колонны, работающего на сдвиг

$$G = \frac{\mathrm{E}}{2(1+\nu)}. \qquad (2.7)$$

После преобразования формулы (2.4) с учетом (2.7) запишем:

$$F = \frac{E_1 h_к S_к}{2(h_б - t_б)(1+\nu)}. \qquad (2.8)$$

Из рассмотрения треугольника AEF и соответствующего силового треугольника AEF (рис. 2.3) следует, что:

$$F_{LД} = \frac{F_2}{\cos\gamma}; \qquad (2.9)$$

$$\Delta_2 = \frac{\Delta_{LД}}{\cos\gamma}. \qquad (2.10)$$

Запишем выражения для деформации диагонального ребра:

$$\Delta_{LД} = \frac{L_Д F_{LД}}{E A_{р.ж}}. \qquad (2.11)$$

Подставляя затем (2.9) в (2.11), а затем в (2.10), получим:

$$\Delta_2 = \frac{F_2 L_Д}{E A_{р.ж} \cos^2\gamma}. \qquad (2.12)$$

Принимая во внимание, что

$$\cos\gamma = \frac{h_к - t_к}{L_Д}, \tag{2.13}$$

запишем окончательное выражение для деформации:

$$\Delta_2 = \frac{F_2 L_Д^3}{EA_{р.ж}(h_к - t_к)}. \tag{2.14}$$

После подстановки (2.9) в (2.11), а затем в (2.10) запишем формулу для расчета усилия F с учетом (2.13):

$$F_2 = \frac{\Delta_2 EA_{р.ж}(h_к - t_к)^2}{L_Д^3}. \tag{2.15}$$

Учитывая (2.2) и (2.3), запишем формулу для вычисления:

$$\Delta_2 = \frac{F}{\dfrac{Eh_к S_к}{2(h_б - t_б)(1+\nu)} + \dfrac{EA_{р.ж}(h_к - t_к)}{L_Д^3}}; \tag{2.16}$$

$$L_д = [(h_б - t_б)^2 + (h_к - t_к)^2]^{1/2}. \quad (2.17)$$

Преобразуем формулу (2.11) с учетом (2.7) и (2.8). Формула для вычисления начальной жесткости участка колонны с диагональным ребром, работающим на сдвиг, выглядит следующим образом:

$$K_c = (h_б - t_б)^2 E \frac{A_{р.ж}(h_к - t_к)}{L_Д^3} + \frac{h_к S_к}{2(1+\nu)(h_б - t_б)}, \quad (2.18)$$

где $A_{р.ж} = (B_к - S_к)t_{р.ж}$ — площадь поперечного сечения диагонального ребра жесткости колонны;

$t_{р.ж}$ — толщина ребра жесткости;

$h_{б(к)}$ — высота профиля балки (колонны);

$t_{б(к)}$ — толщина полки балки (колонны);

$B_к$ — ширина полки колонны;

$S_к$ — толщина стенки колонны.

Если в колонне не имеется диагонального ребра жесткости, то $A_{р.ж} = 0$ в формуле (2.18).

На рис. 2.4 показаны линейные участки диаграмм «M — α» соединения балка—колонна крайнего ряда. Зависимость ① показывает диаграмму «момент — угол поворота» соединения без учета работы участка колонны на сдвиг. Начальная жесткость вычисляется по формуле:

$$K_1 = \frac{M}{\alpha_1}. \quad (2.19)$$

Зависимость ② показывает диаграмму «момент — угол поворота» участка колонны при работе его на сдвиг. Начальная жесткость $K_{сдв}$ есть тангенс угла наклона прямой 2:

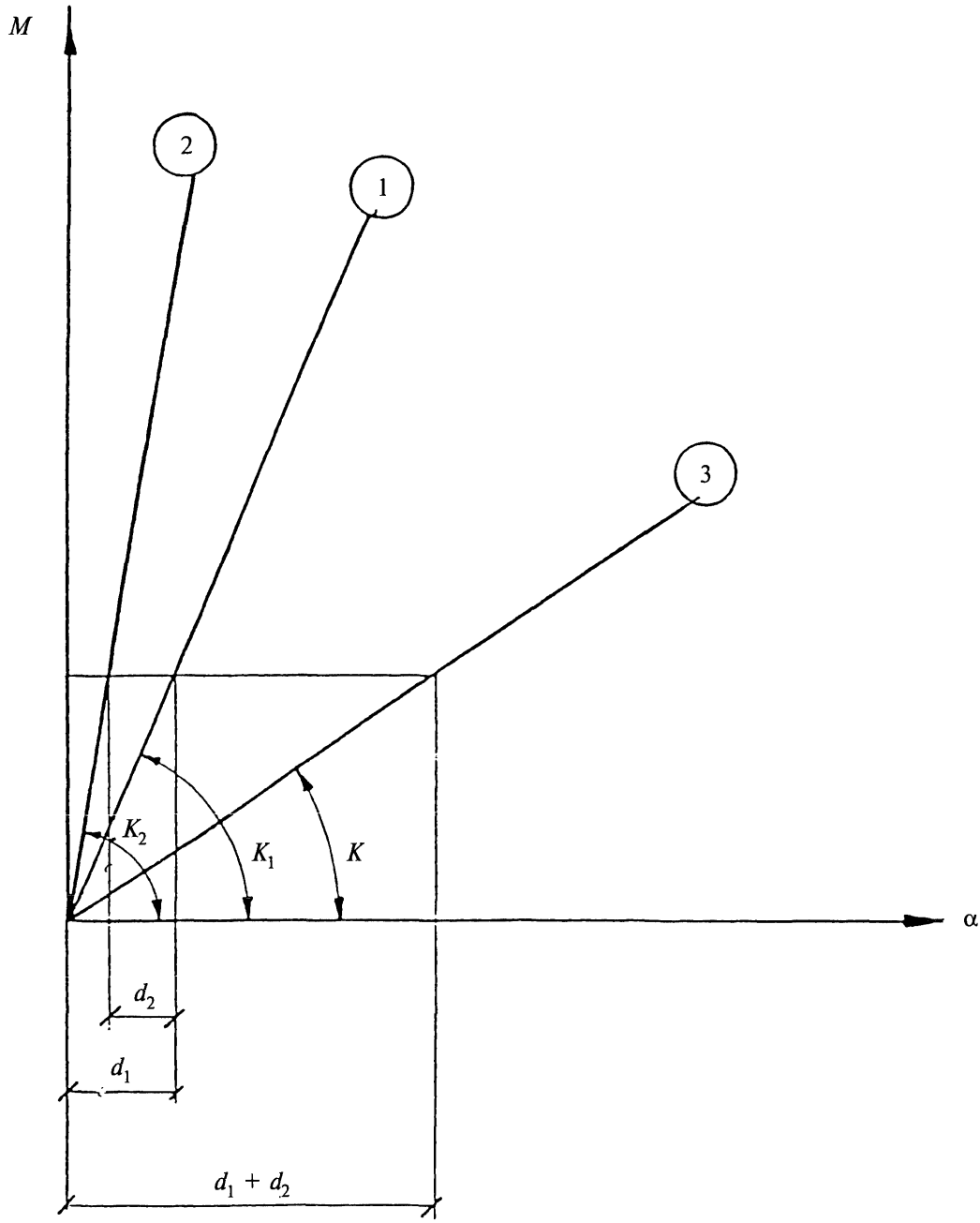


Рис. 2.4. Определение начальной жесткости фланцевых соединений с учетом работы участка колонны на сдвиг

$$K_{сдв} = K_2 = \frac{M}{\alpha_2}. \qquad (2.20)$$

Учитывая, что

$$M = \text{const и } \alpha = \alpha_1 + \alpha_2, \qquad (2.21)$$

$$\alpha = \frac{M}{K_1} + \frac{M}{K_2} = M\frac{K_1 + K_2}{K_1 K_2}, \qquad (2.22)$$

отсюда

$$K = \frac{K_1 K_2}{K_1 + K_2}, \qquad (2.23)$$

K — тангенс угла наклона (начальная жесткость) линейного участка зависимости ③ «момент — угол поворота» для рамного фланцевого соединения с учетом работы участка колонны на сдвиг.

2.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДЕЛЬНОГО ИЗГИБАЮЩЕГО МОМЕНТА, ВОСПРИНИМАЕМОГО СОЕДИНЕНИЕМ

2.3.1. Общие положения

Предельный изгибающий момент, воспринимаемый соединением (M_1), может быть определен как минимальный изгибающий момент, который необходимо приложить к соединению, чтобы в каком-либо его конструктивном элементе наступило предельное состояние. Во фланцевом соединении ригелей с колоннами в работе участвуют болты, фла-

нец, полка и стенка колонны. Соответственно за предельное состояние для этих конструктивных элементов принимаем:

- достижение разрушающих (или расчетных) усилий в стержнях наиболее нагруженных болтов при действии момента M_1 (M_{1p});

- образование пластического механизма во фланце при действии на соединение момента M_2;

- образование пластического механизма в полке колонны при действии на соединение момента M_3;

- достижение напряжений текучести на всем участке стенки колонны, воспринимающем растягивающую нагрузку при наличии ребер жесткости в колонне или без них при действии на соединение момента M_4;

- достижение напряжений текучести на всем участке стенки колонны, воспринимающем сжимающую нагрузку при наличии ребра жесткости или без него, либо потеря устойчивости стенки колонны, воспринимающей сжимающее усилие, если стенка не ужесточена ребрами жесткости, при действии на соединение изгибающего момента M_5;

- достижение напряжений текучести на участке стенки колонны, работающем на сдвиг, при действии момента M_6.

Таким образом, величина предельного момента, воспринимаемого соединением, может быть получена по формуле:

$$M_и = \min (M_1, M_2, M_3, M_4, M_5, M_6). \qquad (2.24)$$

2.3.2. Расчет предельного изгибающего момента, воспринимаемого болтами фланцевого соединения

Болты во фланцевом соединении (изгибаемом или растягиваемом) нагружены весьма неравномерно и это обстоятельство учтено при разработке расчетов ФС на прочность по болтам. Эта неравномерность вызва-

на тем, что участки фланца имеют различную изгибную жесткость, что и является причиной неравномерного нагружения болтов. Участок фланца в месте отверстия под болт, ограниченный двумя ближайшими жестко защемленными кромками (приваренными к нему полкой и ребра ригеля либо полкой и стенкой ригеля), имеет значительно большую жесткость на изгиб нежели участок фланца в месте отверстия под болт, имеющий ближайшую одну жестко защемленную кромку (например, полку или стенку ригеля). Эти участки носят название внутренней зоны (ВЗ) и несут значительно большую нагрузку, чем болты соответственно наружной зоны НЗ, и предельное состояние ФС по болтам определяется наступлением напряжений текучести в болтах ВЗ.

Изгибающий момент, действующий на соединение, должен быть таков, чтобы в этих болтах развивались разрушающие (M_1) или расчетные (M_{1p}), усилия (в зависимости от цели расчета). Нейтральная ось фланцевого соединения при изгибе может с достаточно большой степенью точности принята совпадающей с нейтральной осью примыкающего сечения ригеля. В болтах остальных рядов действующие усилия уменьшаются пропорционально отношению расстояния от данного ряда до нейтральной оси двутавра к расстоянию первого ряда болтов до этой же оси. Для ФС без ребер жесткости предельные усилия развиваются в болтах первого и второго ряда. В болтах остальных рядов расчетные усилия уменьшаются пропорционально отношению расстояния данного ряда до нейтральной оси к расстоянию второго ряда болтов до этой же оси. Для ФС с внутренним расположением болтов (первый ряд болтов отсутствует) максимальные усилия, рассматриваемые как предельные, развиваются в болтах второго ряда. Усилия в болтах остальных рядов ограничиваются так же, как для ФС без ребер жесткости. Суммарное усилие сжатия от изгиба передается в плоскости, проходящей по верхней кромке пояса изгибаемого двутавра.

Из рассмотрения расчетной схемы распределения усилий по высоте опорного сечения примыкающей балки, схемы равновесия усилий относительно нейтральной оси (рис. 2.5) можно сделать вывод, что изгибающий момент, который способно передать ФС, определяется как сумма произведений усилий, воспринимаемых болтами каждого ряда, на плечо, равное расстоянию от этого ряда до плоскости передачи сжимающих усилий.

В соответствии с расчетной схемой и сделанными допущениями выражения для определения изгибающего момента, который может быть воспринят болтами ФС, имеют следующий вид:

Для ФС с ребрами жесткости:

$$M_{\text{пред}} = (2B_{\text{р}} + N_{\text{н}j}\, n_{\text{н1}})\,(h_1 + h_2) + (2B_{\text{р}} + N_{\text{н}j}\, n_{\text{н2}}) \times \\ \times\,(h_1 + h_{01})\, h_2/h_1 + 2N_{\text{н}j}\, n/h_1\,(h_3 + h_4 + \ldots\, h_n)\,(h_n + h_{01}). \quad (2.25)$$

Для ФС без ребер жесткости:

$$M_{\text{пред}} = N_{\text{н}j}\, n_{\text{н1}}\,(h_1 + h_{01}) + (2B_{\text{р}} + N_{\text{н}j}\, n_{\text{н2}})\,(h_2 + h_{01}) + \\ + 2N_{\text{н}j}\, n/h_2\,(h_3 + h_4 + \ldots\, h_n). \quad (2.26)$$

Для ФС с внутренним расположением болтов:

$$M_{\text{пред}} = (2B_{\text{р}} + N_{\text{н}j}\, n_{\text{н}})\,(h_2 + h_{01}) + 2N_{\text{н}j}\, n/h_2 \times \\ \times\,(h_3 + h_4 + \ldots\, h_n), \quad (2.27)$$

$$B_{\text{р}} = 0{,}7\, A_{bn}\, R_{bun}, \quad (2.28)$$

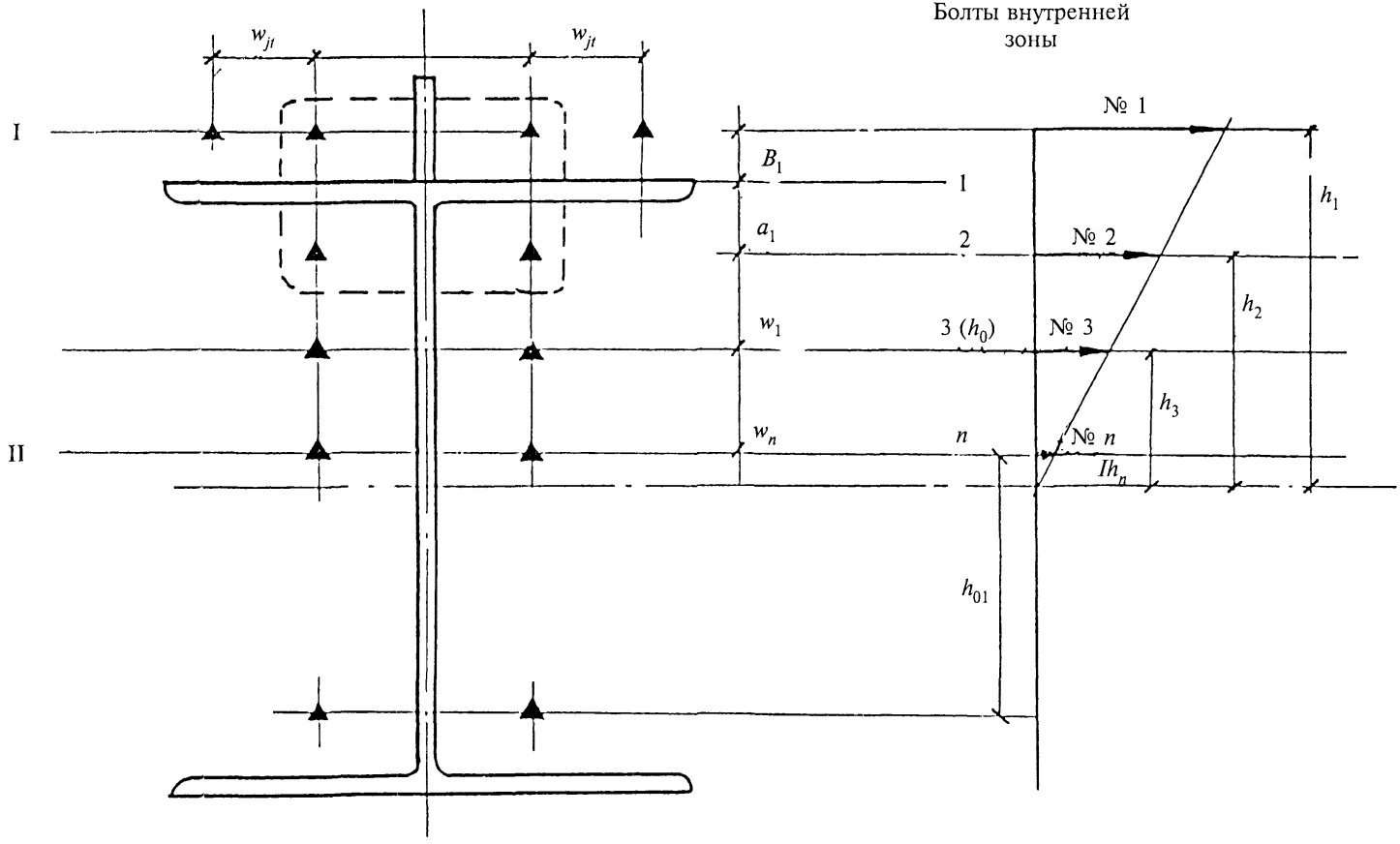


Рис. 2.5. Расчетная схема определения предельного изгибающего момента для ФС по болтам

$B_р$ — разрушающие или расчетные усилия в болтах;

A_{bn} — площадь поперечного сечения стержня болта, нетто;

R_{bun} — нормативное сопротивление стали болтов, принимаемое равным временному сопротивлению по государственным стандартам и техническим условиям на болты;

$N_{нj}$ — усилие на болт наружной зоны j-го Т-образного участка фланца растянутого пояса или стенки;

$n_{н1}$, $n_{н2}$ — число болтов наружной зоны;

n — число болтов растянутой части стенки.

Для болтов наружной зоны

$$N_{нj} = \lambda_j B_р, \tag{2.31}$$

где

$$\lambda_j = 0{,}5088 - 0{,}2356 \lg\chi_j; \tag{2.32}$$

$$\chi_j = \frac{d^2}{w_j(t_ф + D/2)}\left(\frac{b_j}{t_ф}\right)^3. \tag{2.33}$$

В формуле (2.33):

λ_j — параметр жесткости болта;

D — диаметр болта;

$t_ф$ — толщина фланца;

w_j — ширина фланца, приходящаяся на один болт наружной зоны j-го Т-образного участка фланца;

b_j — расстояние от оси болта до края сварного шва j-го Т-образного участка фланца.

В результате преобразований получим формулы для расчета предельных изгибающих моментов фланцевых соединений по наиболее нагруженным болтам (М), которые приведены в таблице 2.1. В таблице были использованы следующие обозначения:

$h_б$ — высота балки;

$t_б$ — толщина полки балки;

b_1 — расстояние от края полки балки до центра отверстия под болт;

w — вертикальное расстояние между болтами;

c — расстояние между вертикальными рядами болтов.

2.3.3. Расчет предельного изгибающего момента воспринимаемого фланцем

Наиболее точным методом для расчета максимальных изгибающих усилий, воспринимаемых фланцами и полками колонн, является метод предельного равновесия. В расчете принята диаграмма работы материала как упруго-пластического тела (рис. 2.6). При расчете фланцев методом предельного равновесия введем следующие допущения:

- распределение напряжений от действия внешней нагрузки в сварных швах, соединяющих фланец с профилем (усиленный ребрами жесткости), равномерное;

- действие болта на фланец представлено сосредоточенной силой по оси болта;

- фланцы жестко защемлены в месте примыкания ригеля.

На рис. 2.7 показана расчетная схема, иллюстрирующая механизмы пластических шарниров фланцев.

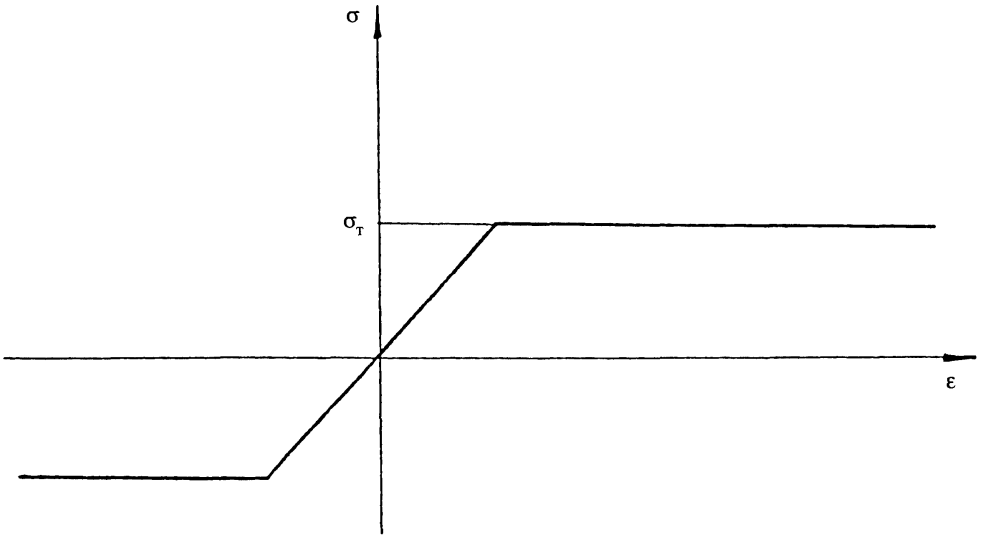


Рис. 2.6. Диаграмма Прандтля для упруго-пластического материала

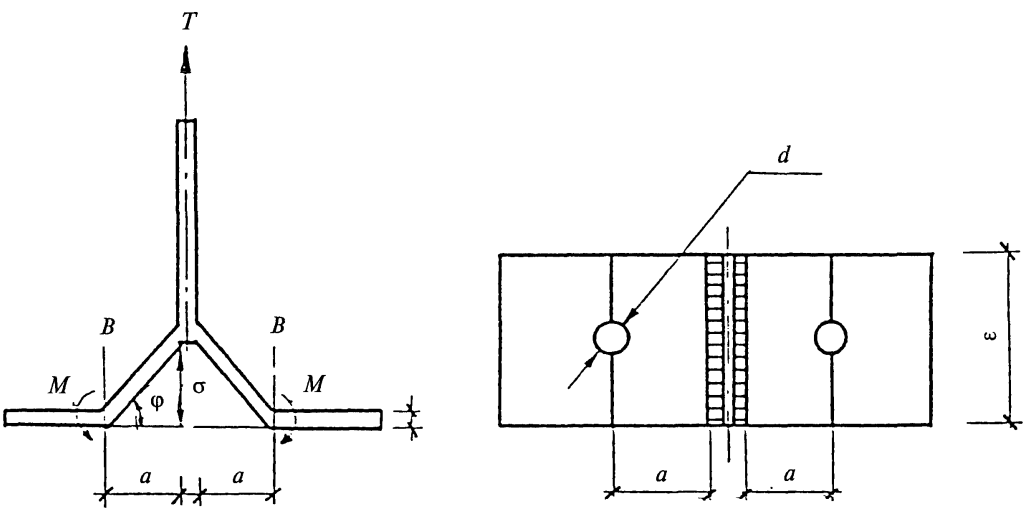


Рис. 2.7. Схема линий пластических шарниров для расчета предельного усилия, действующего на Т-образный фланец в стадии предельного равновесия

Запишем уравнение работы внешней нагрузки и внутренних сил соединения в стадии предельного равновесия, полагая при этом, что незначительное удлинение болтов не оказывает влияния на диссипацию энергии во фланце.

$$T_б = M_\varphi; \tag{2.34}$$

$$M = m_{pl}L; \tag{2.35}$$

$$L = 4W; \tag{2.36}$$

$$m_{pl} = \frac{\sigma_y t_ф^2}{4}, \tag{2.37}$$

где M — пластический момент;

m_{pl} — то же, на единицу длины шарнирной линии;

σ_y — предел текучести стали фланца;

L — длина шарнирной линии.

Принимая во внимание тот факт, что перемещения малы, имеем:

$$\varphi = tg\varphi = \frac{\delta}{a}. \tag{2.38}$$

Из рассмотрения формулы (2.37) видно, что для определения M необходимо знать значение L, которое непосредственно зависит от выбора расчетной схемы предельного равновесия соединений, для определения чего необходимо знать действительные механизмы пластических шарниров (шарнирных линий) изгибаемых фланцев и полок колонн.

Рассмотрим уравнение (2.34) с учетом неравномерного распределения усилий между болтами в ФС и расчетной схемы деформируемого фланца.

Из анализа формул табл. 2.1 видно, что для всех рассмотренных 9 типов фланцев внешние усилия на них, передающиеся через болты разных рядов и разных зон, изменяются пропорционально усилиям в наиболее нагруженных болтах, находящихся во внутренней или наружной зоне первого или второго рядов. Зная усилия в них, можно определить величину изгибающего момента, приложенного к соединению по формулам табл. 2.1.

Эти внешние усилия совершают работу на соответствующих перемещениях δ; δ_1, которая равна работе внутренних сил, рассчитываемой на основе расчетных схем предельного равновесия изгибаемых фланцев (табл. 2.2). Таким образом, задача сводится к получению формул для расчета величины усилия N в наиболее нагруженном болте, при котором к соединению приложен изгибающий момент, величина которого вызывает во фланце образование пластического шарнира (M_2). Так как рассматриваемые типы фланцев симметричны относительно оси «*y-y*», то для упрощения расчетов целесообразно рассматривать одну половину фланца, что и показано в табл. 2.2.

Составим уравнение работ внешних и внутренних сил для фланца 1-го типа.

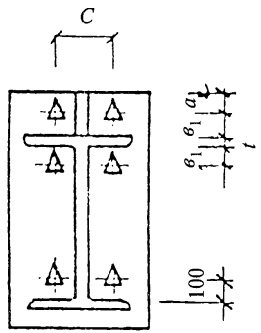
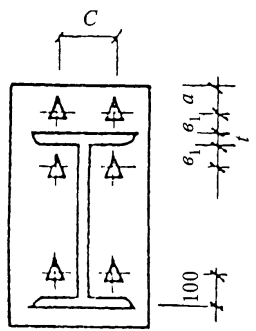
$$A_{\text{в.н}} = A_{\text{п.у}} + A_{\text{ж.к}_1} + A_{\text{ж.к}_2}; \tag{2.39}$$

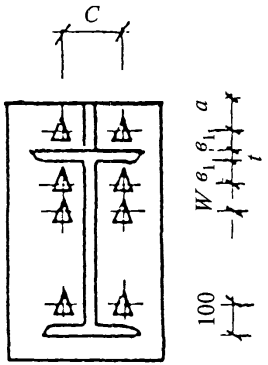
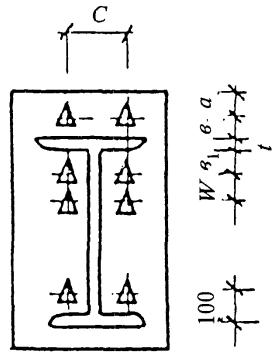
$$A_{\text{в.н}} = T\,\delta; \tag{2.40}$$

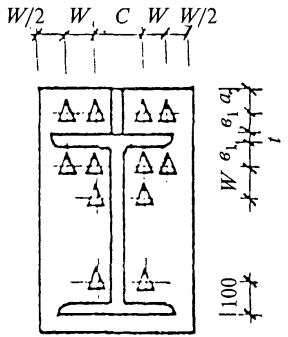
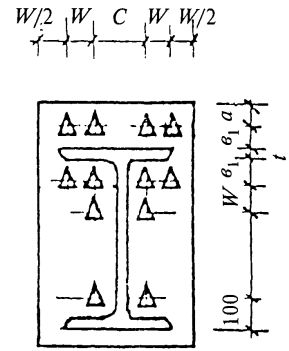
$$T = N + N\frac{h_1}{h_0} = N + N\frac{h_6/2 - b_1 - t_6}{h_6/2 + b_1}. \tag{2.41}$$

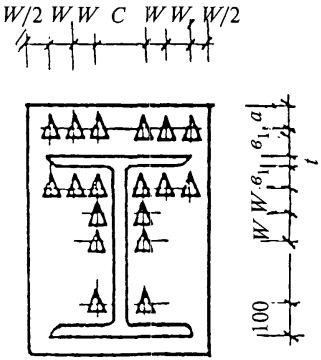
Таблица 2.1

Типы фланцев и определение предельного изгибающего момента по наиболее нагруженным болтам

Тип фланца	Схема	Формула для вычисления изгибающего момента
1		$M_{и}^{b} = 2B_{р}(h + b_1) + 2B_{р}(h - b_1 - t) \cdot \dfrac{\left(\dfrac{h}{2} - b_1 - t\right)}{\left(\dfrac{h}{2} + b_1\right)}$
2		$M_{и}^{b} = 2B_{р}(h_{б} + b_1 - t_{б}) + 2B_{р}(h_{б} - 2b_1 + 2t_{б})$

Тип фланца	Схема	Формула для вычисления изгибающего момента
3		$M_{и}^{b} = 2B_{р}(h + b_1) + 2B_{р}(h - b_2 - t) \cdot \frac{\left(\frac{h}{2} - b_1 - t\right)}{\left(\frac{h}{2} + b_1\right)} + 2\lambda B_1 (h - b_1 - t - W) \times \times \frac{\left(\frac{h}{2} - b_1 - t\right)}{\left(\frac{h}{2} + b_1\right)}$
4		$M_{и}^{b} = 2\lambda B_{р}(h_б + b_1 - t) + 2B_{р}(h_б - 2b_1 - 2t_б) + 2\lambda B_{р} \frac{\left(\frac{h}{2} - b_1 - t_б - W\right)}{\frac{h}{2} - b_1 - t_б} \times \times (h_б - 2b_1 - 2t_б - W)$

Тип фланца	Схема	Формула для вычисления изгибающего момента
5		$M_{и}^{b} = (2B_{р} + 2\lambda B_{р})(h + b_1) + (2B_{р} + 2\lambda B_{р})(h - b_1 - t) \times \frac{\left(\frac{h}{2} - b_1 - t\right)}{\left(\frac{h}{2} + b_1\right)} + 2\lambda B_{р}(h - b_1 - t - W)\frac{\left(\frac{h}{2} - b_1 - t - W\right)}{\left(\frac{h}{2} + b_1\right)}$
6		$M = 4\lambda B_{р}(h_{б} - b_1 - t_{б}) + 2B_{р}(1 + \lambda)(h_{б} - 2b_1 - 2t_{б}) + 2B\frac{\frac{h_{б}}{2} - b_1 - t_{б} - W}{\frac{h}{2} - b_1 - t_{б}}(h_{б} - 2b_1 - 2t_{б} - W)$

Тип фланца	Схема	Формула для вычисления изгибающего момента
7		$M = (2B_p + 4\lambda B_p)(h + b_1) + (2B_p + 4\lambda B_p)(h - b_1 - t) \cdot \frac{\left(\frac{h}{2} - b_1 - t\right)}{\left(\frac{h}{2} + b_1\right)} +$ $+2\lambda B(h - b_1 - t - W) \cdot \frac{\left(\frac{h}{2} - b_2 - t - W\right)}{\left(\frac{h}{2} + b_1\right)} + 2\lambda B(h - b_1 - t - 2W) \times$ $\times \frac{\left(\frac{h}{2} - b - t - W\right)}{\left(\frac{h}{2} + b\right)}$

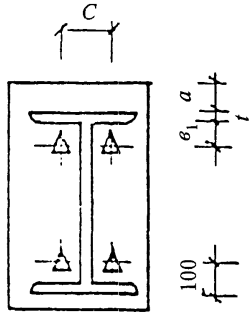
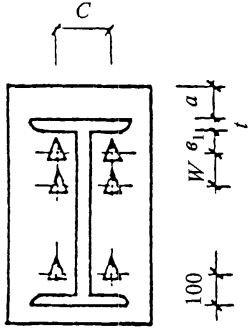
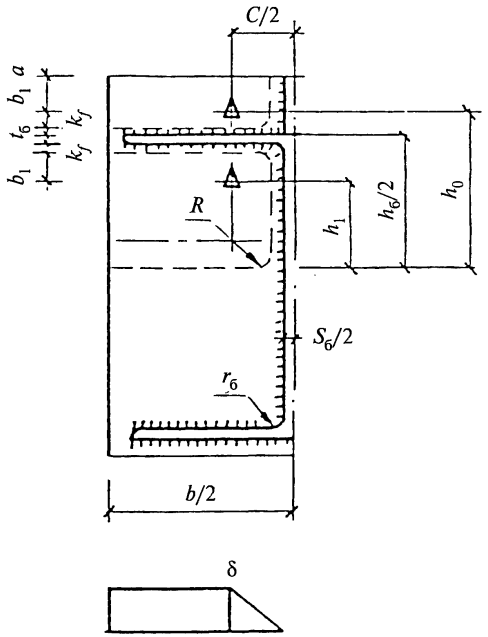
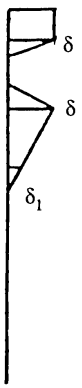
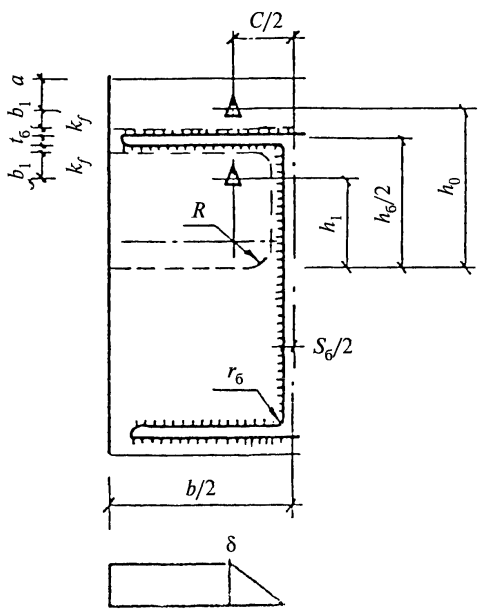
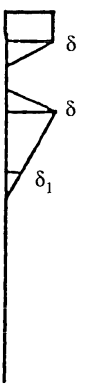
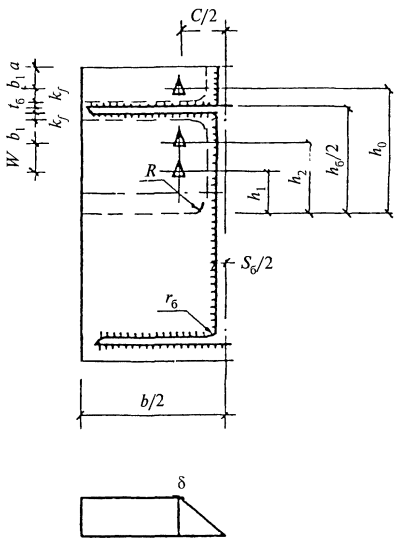
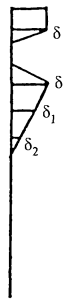
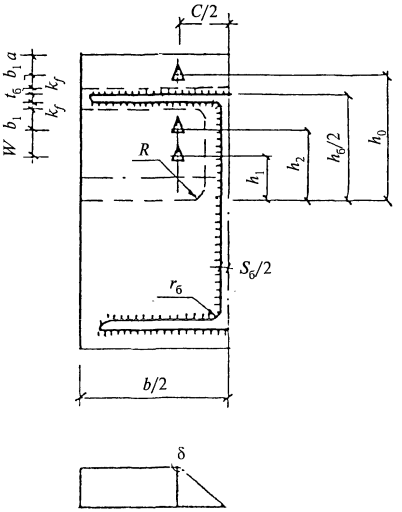
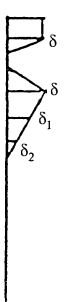
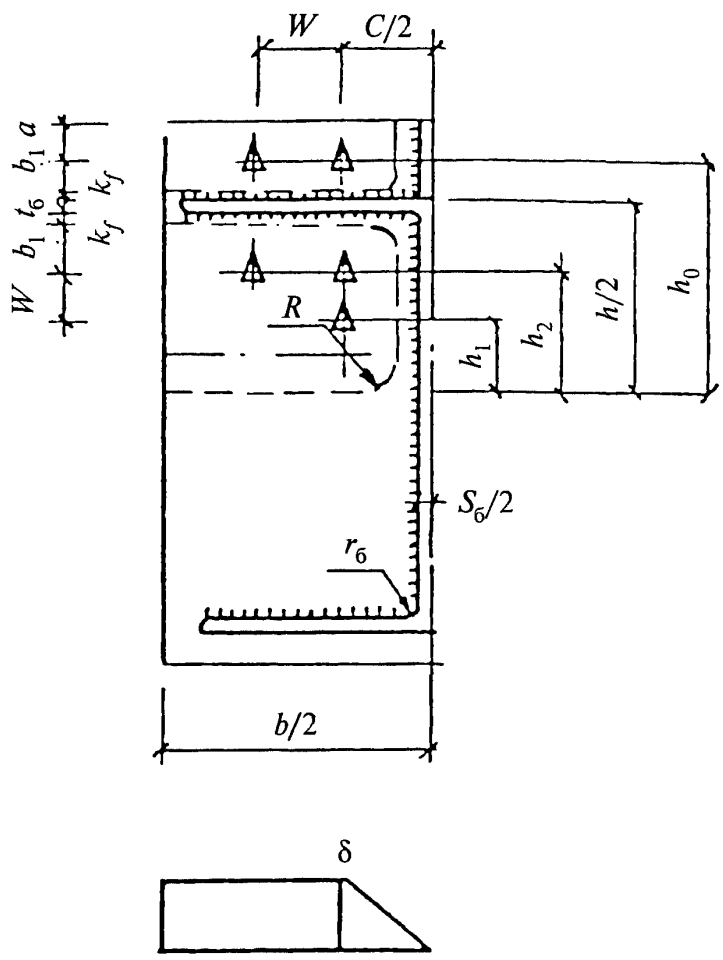
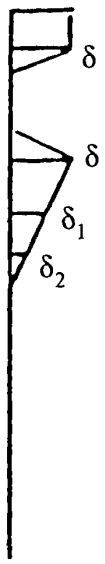
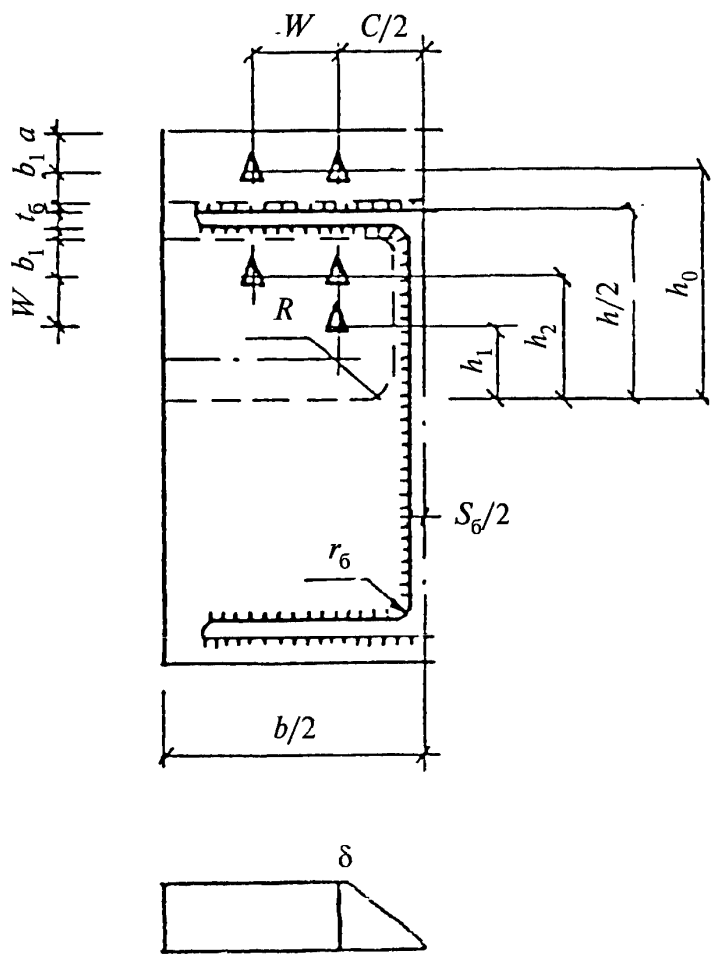
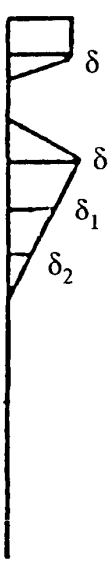
Тип фланца	Схема	Формула для вычисления изгибающего момента
8		$M_{\text{и}}^{b} = 2B_{\text{р}}(h - b_1 - 2t)$
9		$M = 2B(h - b_1 - 2t) + 2\lambda B(h - b_1 - t_6 - W) \cdot \dfrac{\left(\dfrac{h}{2} - b - t - W\right)}{\dfrac{h}{2}}$

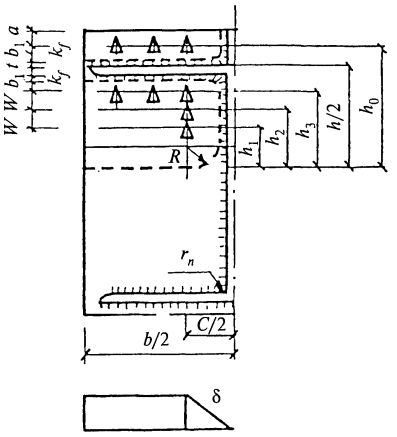
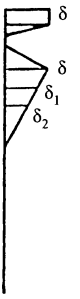
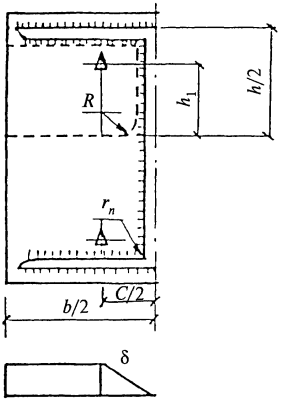
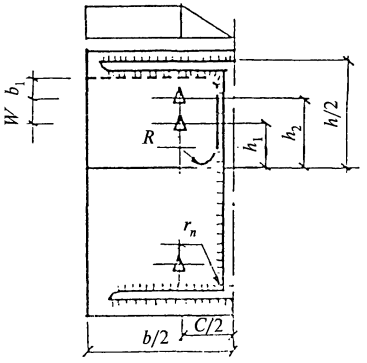
Таблица 2.2

Расчетные схемы предельного равновесия изгибаемых фланцев

Тип фланца	Вид из плоскости фланца	Вид в плоскости фланца
1	2	3
1		 $R = \frac{C}{2} - \frac{S_б}{2} - k_f$
2		 $R = \frac{C}{2} - \frac{S_б}{2} - k_f$

1	2	3
3		 $R = \frac{C}{2} - \frac{S_б}{2} - k_f$
4		 $R = \frac{C}{2} - \frac{S_б}{2} - k_f$

1	2	3
5		 $R = \frac{C}{2} - \frac{S_б}{2} - k_f$
6		 $R = \frac{C}{2} - \frac{S_б}{2} - k_f$

1	2	3
7		 $R = \frac{C}{2} - \frac{S_б}{2} - k_f$
8		 $R = \frac{C}{2} - \frac{S_б}{2} - k_f$
9		 $R = \frac{C}{2} - \frac{S_б}{2} - k_f$

где $A_{в.н}$ — работа внешней нагрузки T на перемещении;

$A_{п.у}$ — работа пластического момента на угле поворота прямолинейных участков;

$A_{ж.к_1}$ — работа пластического момента на окружности, при наличии одной жестко защемленной кромки;

$A_{ж.к_2}$ — работа пластического момента на угле поворота вдоль равноугольной спирали при наличии пересекающихся жестко защемленных кромок.

Согласно /51/

$$A_{ж.к_1} = m_{pl}\,\delta. \tag{2.42}$$

Согласно /24/

$$A_{ж.к._2} = m_{pl}\pi\left(1+\left(\frac{2\ln^n}{\pi}\right)^2\right). \tag{2.43}$$

Из рассмотрения расчетной схемы 1 табл. 2.2 работа $A_{п.у}$ может быть найдена:

$$\begin{aligned} A_{п.у} = {} & 3m_{pl}\frac{B-C}{2}\frac{\delta}{b_1-k_f} + m_{pl}\frac{B-C}{2}\left(\frac{\delta}{b_1-k_f}+\frac{\delta}{\frac{h_б}{2}-b_1}\right)+ \\ & +m_{pl}\frac{B-C}{2}\frac{\delta}{\frac{h_б}{2}-b} + 2m_{pl}a\frac{2\delta}{c-S-2k_f} + 2m_{pl}\times \\ & \times\left(\frac{h_б}{2}-b_1-\frac{C}{2}-\frac{S_б}{2}-k_f\right)\frac{2\delta}{C-S_б-2k_f}. \end{aligned} \tag{2.44}$$

Приравнивая (2.41), с одной стороны, и сумму (2.44—2.46) — с другой, получаем:

$$N\delta + N\delta\frac{\frac{h_б}{2} - b - t_б}{\frac{h_б}{2} - b_1} = 3m_{pl}\frac{B-C}{2}\frac{\delta}{b_1 - k_f} +$$
$$+m_{pl}\frac{B-C}{2}\left(\frac{\delta}{b_1 - k_f} + \frac{\delta}{\frac{h_б}{2} - b_1}\right) + m_{pl}\frac{B-C}{2}\frac{\delta}{\frac{h_б}{2} - b} +$$
$$+2m_{pl}a\frac{2\delta}{C - S_б - 2k_f} + 2m_{pl}\delta\pi\left(1 + \left(\frac{2\ln h}{\pi}\right)^2\right) + \qquad (2.45)$$
$$+2m_{pl}\left(\frac{h_б}{2} - b_1 - \frac{C}{2} - \frac{S_б}{2} - k_f\right)\frac{2\delta}{C - S_б - 2k_f} + 2m_{pl}\delta.$$

Отсюда после сокращения и преобразований получаем:

$$N = m_{pl}\left(\frac{2(B-C)}{b_1 - k_f} + \frac{2(B-C)}{h_б - 2b_1} + \frac{4a + 2(h_б - 2b_1 - C - S_б - 2k_f}{C - S_б - 2k_f}\right) +$$
$$+1 + 2\pi\left(1 + \left(\frac{2\ln h}{\pi}\right)^2\right)\left(1 + \frac{h_б - 2t_б - 2b_1}{h_б + 2b_1}\right)^{-1}. \qquad (2.46)$$

Подставляя полученную вместо величины $B_р$ величину N в формулу (2.35), получим искомую формулу для расчета изгибающего момента, вызывающего образование пластического шарнира во фланце 1-го типа:

$$M_2 = 2N(h_б + b_1) + 2N(h_б - b_1 - t_б)\frac{h_б/2 - b_1 - t_б}{h_б/2 + b_1}. \qquad (2.47)$$

Для фланцев типов 2—9 расчет предельных изгибающих моментов производится аналогично расчету M_2 для фланца 1-го типа:

- составляется уравнение работ внешних и внутренних сил из рассмотрения расчетных схем табл. 2.2;

- после преобразования уравнений получаются выражения для максимальных усилий, возникающих в наиболее нагруженных болтах (N).

Приведем здесь окончательные формулы для расчета соответствующих усилий в болтах:

- для фланца 2-го типа:

$$N = \frac{m_{pl}}{1+\lambda}\left(\frac{B}{b_1 - k_f} + \frac{B-C}{b_1 - k_f} + \frac{B-C}{\frac{h_б}{2} - b_1 - t_б} + \right.$$
$$\left. + \pi\left(1 + \left(\frac{2\ln h}{\pi}\right)^2\right)\right) + \frac{2\left(\frac{h_б}{2} - b_1 - t_б - \frac{C}{2} + \frac{S_б}{2} + k_f\right)}{\frac{C}{2} - \frac{S_б}{2} - k_f} + \qquad (2.48)$$
$$+ \frac{\frac{C}{2} - \frac{S_б}{2} - k_f}{\frac{h_б}{2} - b_1 - t_б};$$

- для фланца 3-го типа:

$$N = m_{pl}\left(\frac{2(B-C)}{b_1 - k_f} + \frac{2(B-C) + (h_б - 2b_1 - 2w)}{h_б - 2b}\right) +$$
$$+ \frac{4a + 2(h_б - 2b_1 - C - S_б - 2k_f)}{C - S_б - 2k_f} + 2\pi\left(1 + \left(\frac{2\ln h}{\pi}\right)^2\right) \times \qquad (2.49)$$
$$\times\left(1 + \frac{h_б - 2t_б - 2b_1}{h_б + 2b}\right) + \lambda\frac{(h_б - 2t_б - 2b_1 - 2w)(h_б - 2b_1 - 2w)}{h_б^2 - 2b_1^2},$$

где $$n - \frac{2(b_1 - k_f)}{C - S_б - 2k_f}; \qquad (2.50)$$

- для фланца 4-го типа:

$$N = \frac{m_{pl}}{\left(1 + \lambda + \lambda \dfrac{\dfrac{h_б}{2} - b_1 - t_б - w}{\dfrac{h_б}{2} - b_1 - t_б}\right)}\left(\frac{B}{b_1 - k_f} + \frac{B - C}{b_1 - k_f} + \frac{B - C}{\dfrac{h_б}{2} - b_1 - t_б} + \right.$$
$$+ \frac{\dfrac{C}{2} - \dfrac{S_б}{2} - k_f}{\dfrac{h_б}{2} - b - t_б} + \frac{2\left(\dfrac{h_б}{2} - b_1 - t_б - \dfrac{C}{2} + \dfrac{S_б}{2} + k_f\right)}{\dfrac{C}{2} - \dfrac{S_б}{2} - k_f} + \qquad (2.51)$$
$$\left. + \pi\left(1 + \left(\frac{2\ln h}{\pi}\right)^2\right)\right);$$

- для фланца 5-го типа:

$$N = m_{pl}\left(\frac{2(B - C)}{b_1 - k_f} + \frac{2(B - C) + (h_б - 2b_1 - 2w)}{h_б - 2b_1} + \right.$$
$$\left. \frac{4a + 2(h_б - 2b_1 - C - S_б - 2k_f)}{C - S_б - 2k_f} + 2\pi\left(1 + \left(\frac{2\ln h}{\pi}\right)^2\right)\right) \times \qquad (2.52)$$
$$\times\left(1 + \lambda + (1 + \lambda)\frac{h_б - 2t_б - 2b_1}{h_б - 2b_1} + \lambda\frac{(h_б - 2t_б - 2b_1 - 2w)(h_б - 2b_1 - 2w)}{h_б^2 - 2b_1^2}\right),$$

где $$h = \frac{2(b_1 - k_f)}{C - S_б - 2k_f}; \qquad (2.53)$$

- для фланца типа 6:

$$N = \frac{m_{pl}}{\left(2\lambda + 1 + \lambda + \lambda\dfrac{\left(\dfrac{h_б}{2} - b_1 - t_б - w\right)}{\dfrac{h_б}{2} - b_1 - t_б}\right)}\left(\frac{B}{b_1 - k_f} + \frac{B-C}{b_1 - k_f} + \frac{B-C}{\dfrac{h_б}{2} - b_1 - t_б}\right) +$$

$$+\pi\left(1 + \left(\frac{2\ln h}{\pi}\right)^2\right) + \frac{2\left(\dfrac{h_б}{2} - b_1 - t_б - \dfrac{C}{2} + \dfrac{S_б}{2} + k_f\right)}{\dfrac{C}{2} - \dfrac{S_б}{2} - k_f} + \frac{\dfrac{C}{2} - \dfrac{S_б}{2} - k_f}{\dfrac{h_б}{2} - b - t_б}; \qquad (2.54)$$

- для фланца типа 7:

$$N = m_{pl}\left(\frac{2(B-C)}{b_1 - k_f} + \frac{2(B-C) + (h_б - 2b_1 - 4w)}{h_б - 2b_1}\right) +$$

$$+2\pi\left(1 + \left(\frac{2\ln h}{\pi}\right)^2\right) + \frac{4a + 2(h_б - 2b_1 - C - S_б - 2k_f)}{C - S_б - 2k_f} \times$$

$$\times\left(1 + 2\lambda + (1 + 2\lambda)\frac{h_б - 2t_б - 2b_1}{h_б - 2b_1} + \lambda(h_б - 2b_1 - 4w) \times\right. \qquad (2.55)$$

$$\left. \times\frac{(h_б - 2b_1 - 2w)(h_б - 2t_б - 2b_1 - 4w)(h_б - 2b_1 - 4w)}{(h_б - 2b_1)(h_б - 2b_1)}\right),$$

где

$$h = \frac{2(b_1 - k_f)}{C - S_б - 2k_f}; \qquad (2.56)$$

- для фланца типа 8:

$$N = m_{pl}\left(\frac{(B-C)}{2(b_1-k_f)} + \frac{B-C}{2}\left(\frac{h_б - 2k_f}{(b_1-k_f)(h_б-2b_1)}\right) + \right.$$
$$+\frac{B-C}{h_б-2b_1} + \frac{2(h_б - 2b_1 - C + S_б + 2k_f}{C - S_б - 2k_f} +$$
$$\left. +\pi\left(1+\left(\frac{2l_n h}{\pi}\right)^2\right)\right) + \frac{C - S_б - 2k_f}{h_б - 2b_1}; \qquad (2.57)$$

- для фланца типа 9:

$$N = m_{pl}\left(1+\lambda+\lambda\frac{\frac{h_б}{2}-b_1-w}{\frac{h_б}{2}-b_1}\right)^{-1}\left(\frac{B-C}{b_1-k_f}+\frac{B-C}{\frac{h_б}{2}-b_1}\right) +$$
$$+\frac{2\left(\frac{h_б}{2}-b_1-\frac{C}{2}+\frac{S_б}{2}+k_f\right)}{C-S_б-2k_f} + \pi\left(1+\left(\frac{\ln h}{\pi}\right)^2\right) + \qquad (2.58)$$
$$+\frac{C-S_б-2k_f}{b_1-2k_f},$$

где
$$n = \frac{2(b_1-k_f)}{C-S_б-2k_f}. \qquad (2.59)$$

Для получение расчетных формул предельных изгибающих моментов фланцев типов 2—9 полученные значения следует подставить в соответствующие формулы табл. 2.1 вместо величины $B_р$.

2.3.4. Расчет предельного изгибающего момента, воспринимаемого полками колонн

Расчет также производим по методу предельного равновесия.

Для всех типов ФС внешние усилия на полку колонны передаются через болты. Распределение усилий между болтами зависит от их

положения в зоне соединения и по высоте. Расчет внешнего изгибающего момента, приложенного к соединению, проводится по формулам табл. 2.1.

Внешние усилия совершают работу на соответствующих перемещениях, которая равна работе внутренних сил, рассчитываемой на основе расчетных схем предельного равновесия изгибаемых полок колонн (табл. 2.3). Рассматривали два типа опорных частей колонн: с ребрами жесткости и без них.

Примем следующие допущения для расчета полки по методу предельного равновесия:

- распределение напряжений от действия внешней нагрузки в сварных швах, соединяющих полку колонны с ребром жесткости, равномерное;

- действие болта на полку колонны представлено сосредоточенной силой по оси болта;

- полка колонны жестко защемлена в месте примыкания стенки и ребер жесткости;

- обратная накладка работает совместно с полкой колонны: при расчете полки колонны с опорной частью типа 2 полагаем толщину рассматриваемой пластины равной толщине полки плюс толщина обратной накладки.

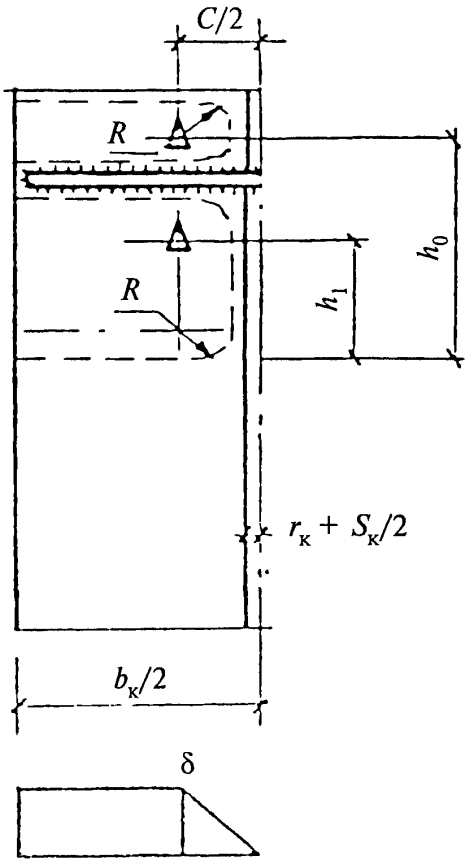
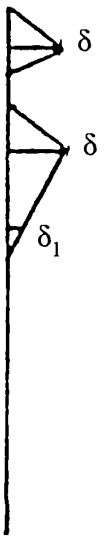
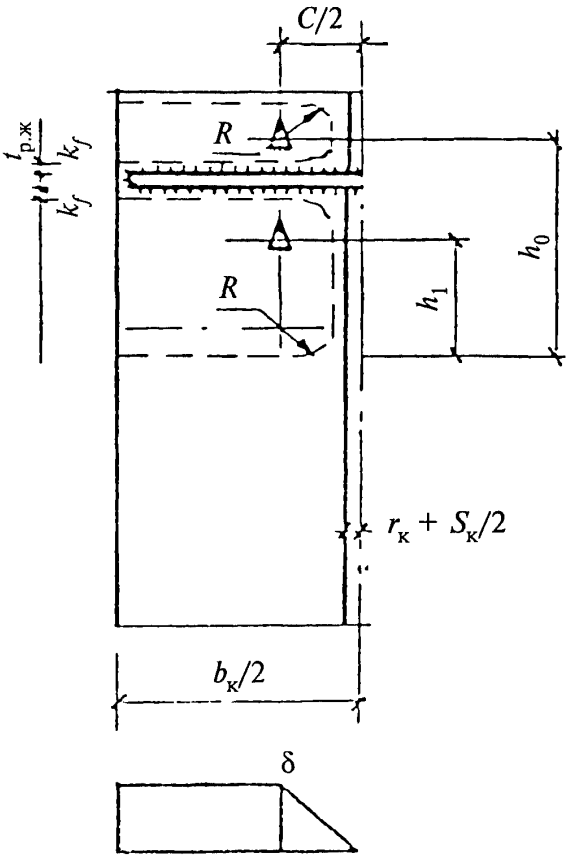
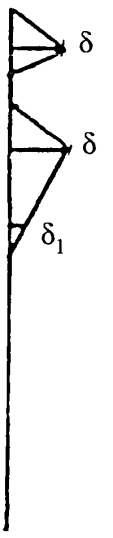
Уравнение работ внешних и внутренних сил для полки колонны может быть записано в общем виде:

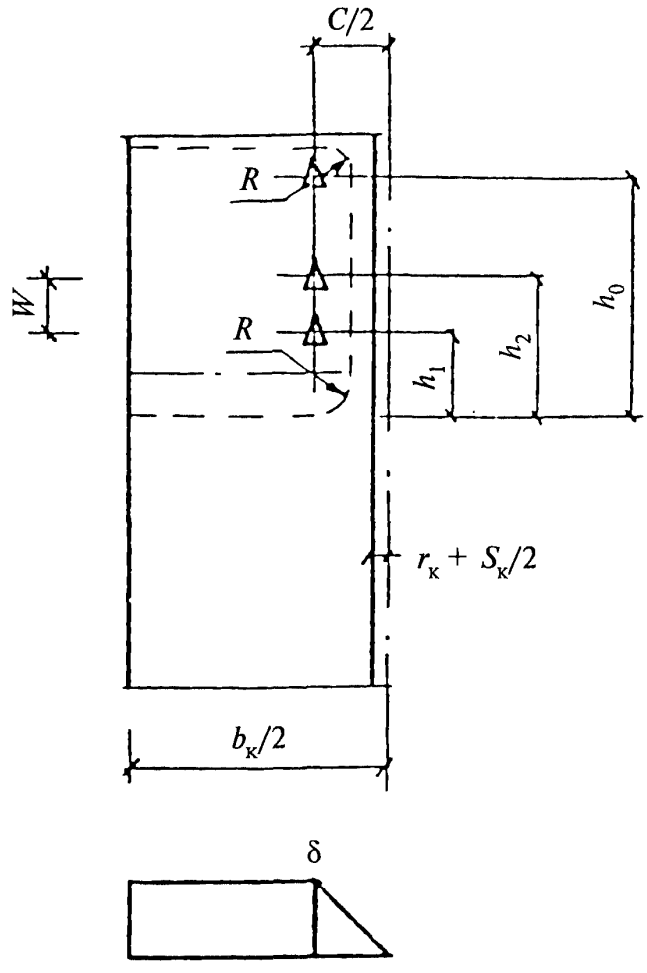
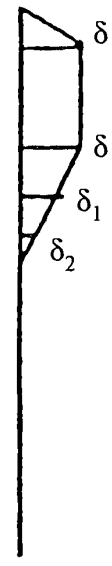
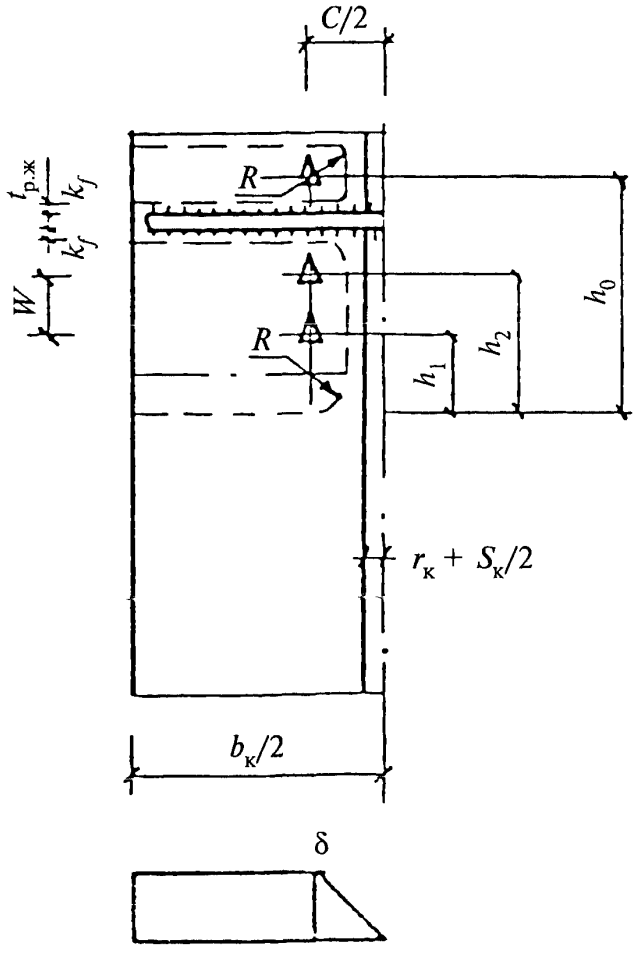
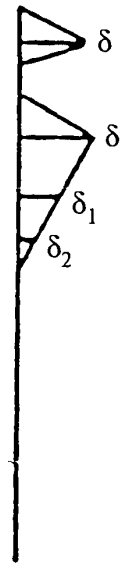
$$A_{в.н} = A_{п.у} + A_{ж.к_1} + A_{Ж.К_2}. \qquad (2.60)$$

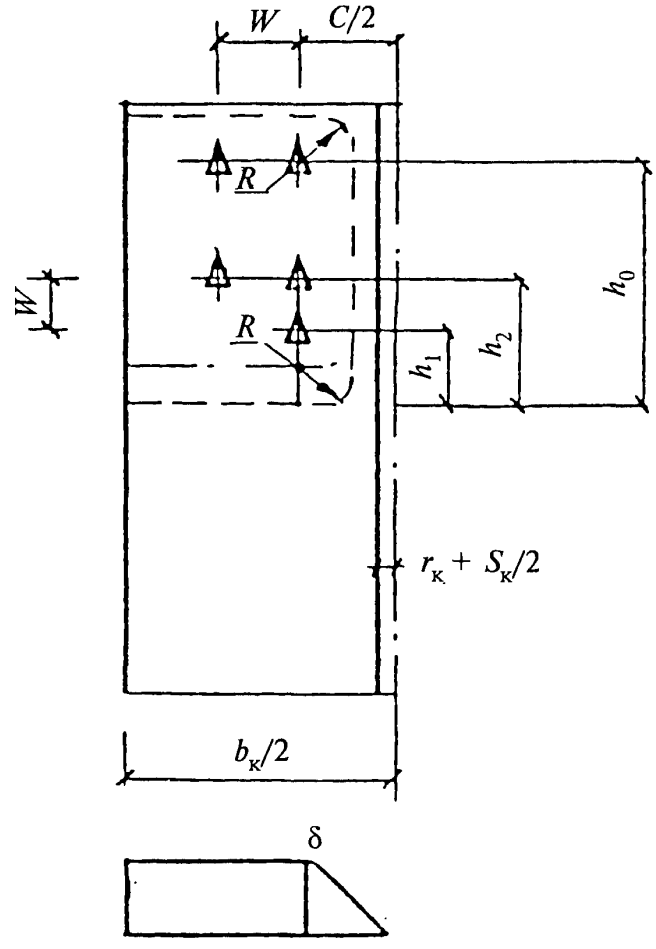
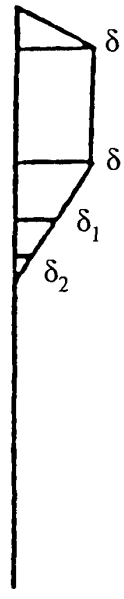
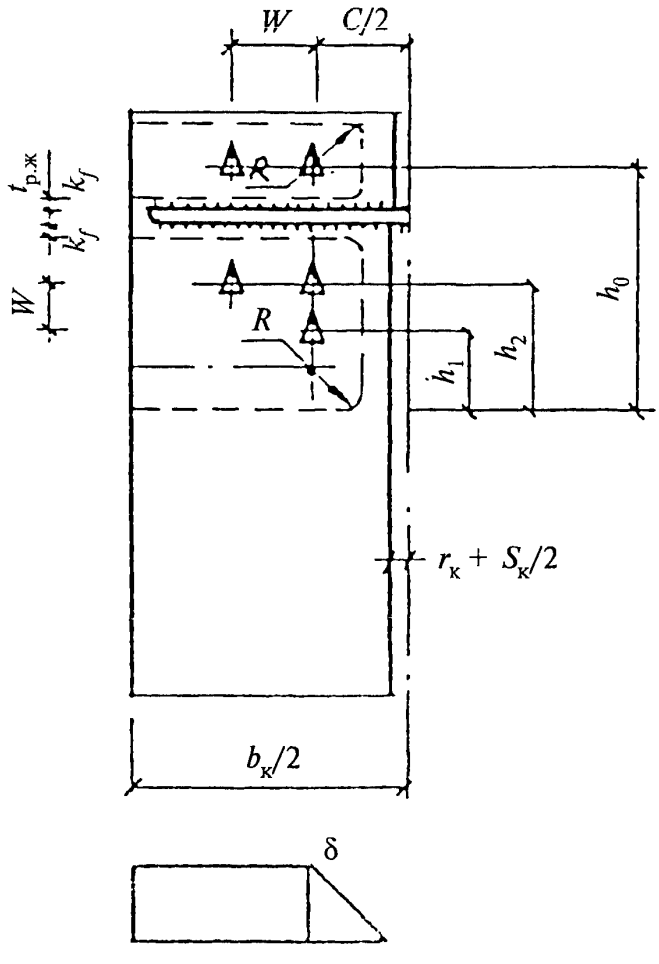
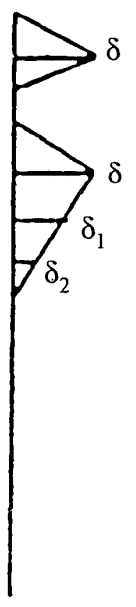
Обозначения работ те же, что и в (2.39). Далее разработка методики расчета формул для предельных моментов ведется аналогично алгоритму расчета предельного момента для фланцев. Для изгибаемой полки

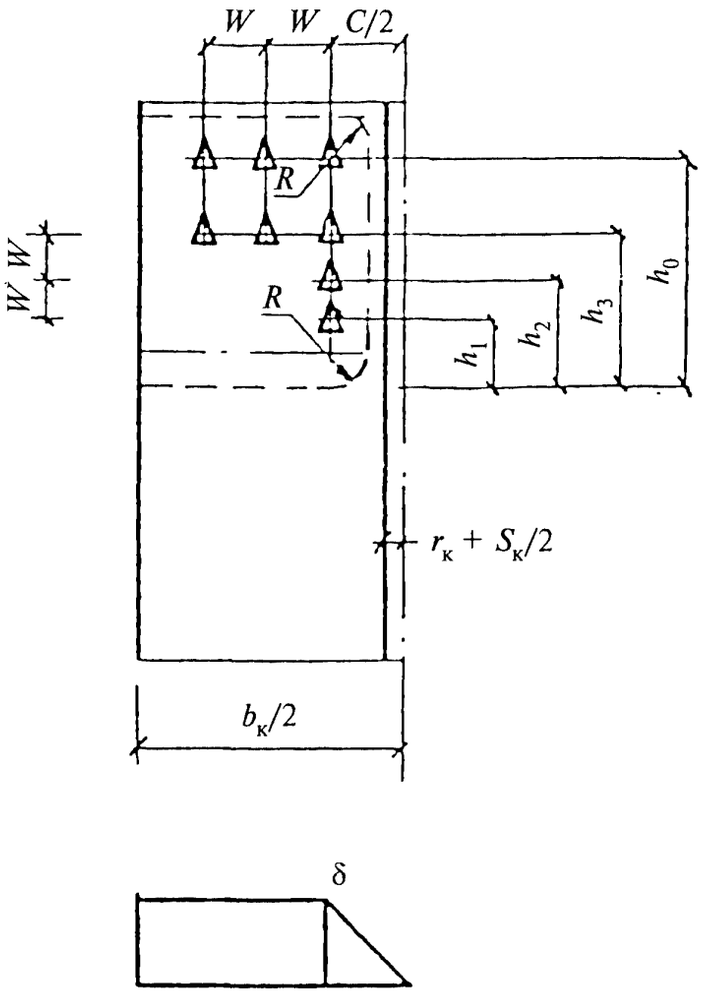
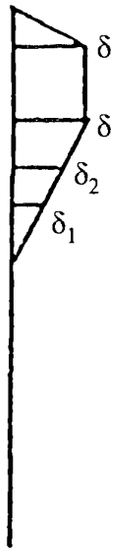
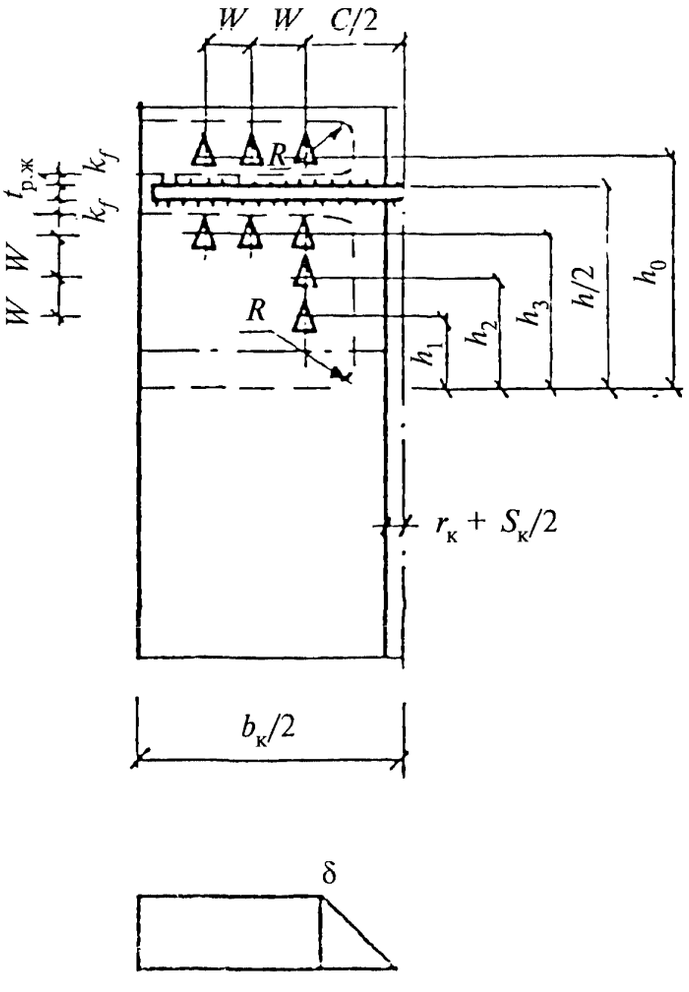
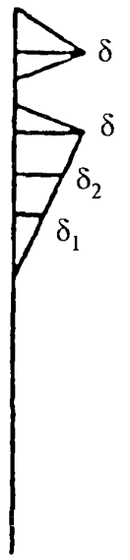
Таблица 2.3

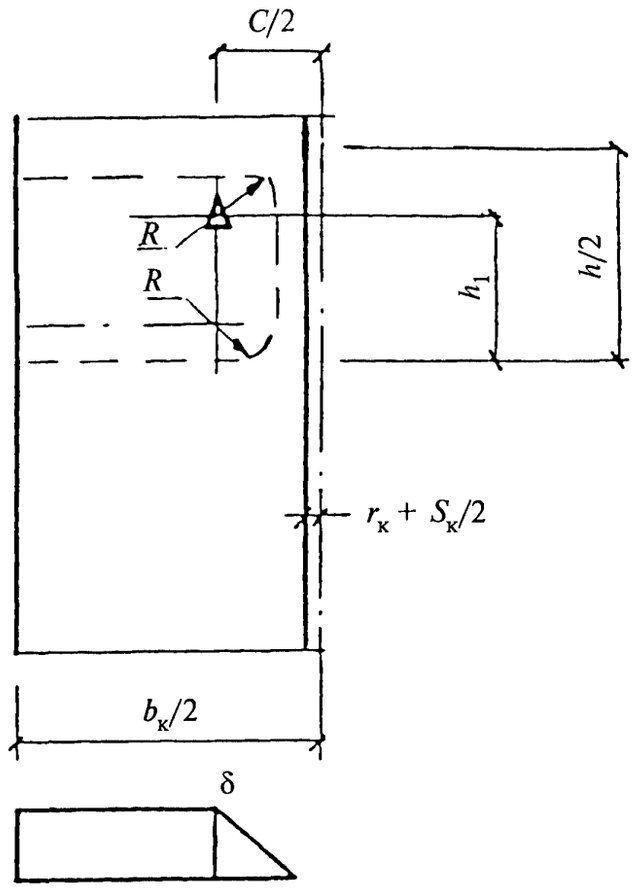
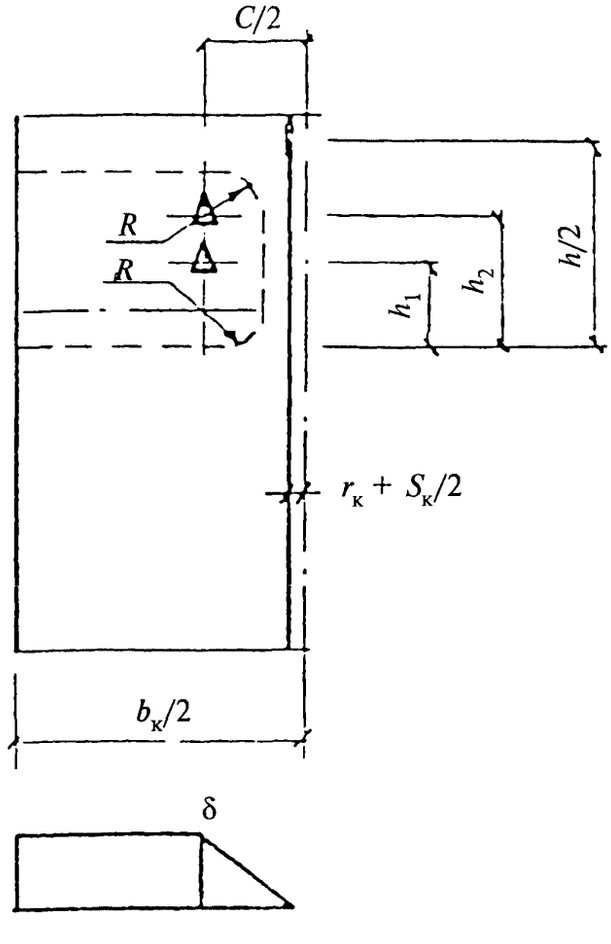
Расчетные схемы предельного равновесия изгибаемых полок колонн

Тип фланца	Тип колонн	Вид из плоскости полки колонны	Вид в плоскости полки колонны
1	2	3	4
1,2	1 Колонна без ребер		 $R = \frac{C}{2} - \frac{S_б}{2} - r_к$
	2 Колонна с ребром		 $R = \frac{C}{2} - \frac{S_б}{2} - r_к$

1	2	3	4
3,4	1		 $R = \frac{C}{2} - \frac{S_б}{2} - r_к$
	2		 $R = \frac{C}{2} - \frac{S_б}{2} - r_к$

1	2	3	4
5,6	1		 $R = \frac{C}{2} - \frac{S_б}{2} - r_к$
	2		 $R = \frac{C}{2} - \frac{S_б}{2} - r_к$

1	2	3	4
7	1		 $R = \frac{C}{2} - \frac{S_б}{2} - r_к$
	2		 $R = \frac{C}{2} - \frac{S_б}{2} - r_к$

1	2	3	4
8	1		 $R = \frac{C}{2} - \frac{S_б}{2} - r_к$
9	2		 $R = \frac{C}{2} - \frac{S_б}{2} - r_к$

колонны с опорной частью первого типа и фланцев 1-го и 2-го типов уравнение (2.36) может быть записано в развернутом виде:

$$N\delta + N\delta\frac{\frac{h_б}{2} - t_б - b_1}{\frac{h_б}{2} + b_1} = 2m_{pl}\frac{b_к - C}{2}\frac{2\delta}{C - S_к - 2r_к} +$$
$$+2m_{pl}\frac{b_к - C}{2}\frac{2\delta}{h_б - 2b_1} + 2m_{pl}\delta + 2m_{pl}(2b_1 + t_б)\times \qquad (2.61)$$
$$\times\frac{2\delta}{C - S_к - 2r_к} + 2m_{pl}\left(\frac{h_б}{2} - b_1 - \frac{C}{2} - \frac{S_к}{2} + r_к\right)\frac{2\delta}{C - S_к - 2r_к}.$$

После преобразования уравнения (2.61) получим формулу для расчета усилия в наиболее нагруженном болте (фланцевого соединения с фланцем типа 1), при котором в полке колонны 1-го типа образуется пластический шарнир (табл. 2.4). Для расчета моментов M_3 значение N должно быть подставлено в формулы поз. 1; 2 табл. 2.1 вместо величины $B_р$.

В таблице 2.4 представлены формулы для расчета усилий N для изгибаемых полок колонн типа 1 и 2 и присоединяемых к ним фланцев типов 1—9, полученных аналогичным образом. Для расчета изгибающих моментов необходимо подставить значения N в соответствующие формулы табл. 2.1 вместо величины $B_р$.

2.3.5. Расчет предельного изгибающего момента, воспринимаемого растянутой частью стенки колонны

На растяжение в верхней части узла работает «эффективная зона» стенки. Величина предельного изгибающего момента должна быть такой, чтобы на всем участке зоны возникали напряжения текучести.

Для расчета предельного усилия, воспринимаемого участком стенки колонны, предлагаем формулу.

Таблица 2.4

Формулы расчета усилий в наиболее нагруженном болте для определенного момента, действующего на изгибаемую полку колонны

Тип фланца	Тип колонн	Определение усилия в наиболее нагруженном болте
1	2	3
1;2	1	$N = 2m_{pl}\left(\frac{(b_c - C) + 2(b_1 + t)(h - 2b_1 - C - S_к - 2r)}{C - S_c - 2r} + 1 + \frac{(b_c - C)}{h - 2b_1}\right)\left(1 + \frac{h - 2t - 2b_1}{h + 2b_1}\right)^{-1}$
	2	$N = 2m_{pl}\left(\frac{4(b_c - C) + 2(h - 2b_1 - C - S - 2r)}{C - S_c - 2r} + \frac{3(b_c - C)}{2b_1 + t - t_{st} - 2k_f} + \frac{2(b_c - C)}{h - 2b_1}\right) + +2 + 2\pi\left[1 + \left(\frac{2\ln h}{\pi}\right)^2\right]\left(1 + \frac{h - 2t - 2b_1}{h + 2b_1}\right)^{-1}$
3;4	1	$N = m_{pl}\frac{2(h + b_c - S_c) + 4(2b_1 + t - b - r - C)}{C - S_c - 2r} + 1 + \frac{2(b_1 - b - w - r) + h - C - S_c}{h - 2b_1} \times \times\left(1 + \frac{h - 2t - 2b_1}{h + 2b_1} + \lambda\frac{(h - 2t - 2b_1 - 2w)(h - 2b_1 - 2w)}{h^2 - 2b_1^2}\right)^{-1}$

1	2	3
3;4	2	$$N = m_{pl}\left(\frac{2(b_c + h - S) - 4(C + b_1 + r)}{C - S - 2r} + \frac{3(b_c - C)}{2b + t - t_н - 2k} + \frac{2(b_c - C) + (h - 2b_1 - 2w}{h - 2b_1}\right) +$$ $$+1 + 2\pi\left[1 + \left(\frac{2\ln h}{\pi}\right)^2\right]\left(1 + \frac{h - 2t - 2b_1}{h + 2b_1} + \lambda\frac{(h - 2t - 2b_1 - 2w)(h - 2b_1 - 2w)}{h^2 - 2b_1^2}\right)^{-1}$$
5;6	1	$$N = m_{pl}\left(\frac{2(b_c + h - S_c) + 4(b_1 + t - C - r)}{C - S_c - 2r} + 1 + \frac{2(b_c - b_1 - w - r) + h - C - S_c}{h - 2b_1}\right)\times$$ $$\times\left(1 + \lambda + (1 + \lambda) + \frac{h - 2t - 2b_1}{h + 2b_1} + \lambda\frac{(h - 2t - 2b_1 - 2w)(h - 2b_1 - 2w)}{h^2 - 2b_1^2}\right)^{-1}$$
	2	$$N = m_{pl}\left(\frac{2(b_c - C) + 2(h - 2b_1 - C - S_c - 2r)}{C - S_c - 2r} + 1 + \frac{4(b_c - C)}{20 + t - t_{sk} - 2k_f} + \frac{2(b_c + C) + h - 2C_1 - 2w}{h - 2b_1}\right) +$$ $$+2\pi\left[1 + \left(\frac{2\ln n}{\pi}\right)^2\right]\left(1 + \lambda + (1 + \lambda)\frac{h - 2t - 2b_1}{h + 2b_1} + \lambda\frac{(h - 2t - 2b_1 - 2w)(h - 2b_1 - 2w)}{h^2 - 2b_1^2}\right)^{-1}$$

Продолжение табл. 2.4

1	2	3
7	1	$N = m_{pl}\left(\frac{2(b_c - C) + 4(t + 2b_1) + 2(h - 2b_1 - C - S_c - 2r)}{C - S_c - 2r} + 1 + \frac{2(b_c - C) + h - 2b_1 - 4w + C - S - 2r}{h - 2b_1}\right) \times$ $\times\left(1 + 2\lambda + (1 + 2\lambda)\left(\frac{h - 2t - 2b_1}{h + 2b_1}\right) + \lambda\left(\frac{(h - 2t - 2b_1 - 2w)(h - 2b_1 - 2w)}{h^2 - 2b_1^2} + \right.\right.$ $\left.\left. + \frac{(h - 2t - 2b_1 - 4w)(h - 2b_1 - 4w)}{h^2 - 2b_1^2}\right)\right]^{-1}$
	2	$N = m_{pl}\left(\frac{2(b_c - C) + 2(h - 2b_1 - C - S_c - 2r)}{C - S_c - 2r} + 1 + 2\pi\left[1 + \left(\frac{2\ln n}{\pi}\right)^2\right] + \right.$ $+ \frac{4(b_c - C)}{2b_1 + t - t_{st} - 2k_f} + \frac{2(b_c - C) + h - 2b_1 - 4w}{h - 2b_1}\left)\right[1 + 2\lambda + (1 + 2\lambda)\left(\frac{h + 2t - 2b_1}{h + 2b_1}\right) +$ $+ \frac{(h - 2t - 2b_1 - 2w)(h - 2b_1 - 2w)}{(h - 2b_1)(h + 2b_1)} + \frac{(h - 2t - 2b_1 - 4w)(h - 2b_1 - 4w)}{(h - 2b_1)(h + 2b_1)}\Bigg]^{-1}$

1	2	3
8	1	$$N = m_l\left(\frac{b_c - C}{C - S - 2r} + \frac{b_c - C}{h - 2b_1} + \frac{(b_c - C)(h - 2b_1 + C - S_c - 2r)}{2(C - S_c - 2r)(h - 2b_1)} + \right.$$ $$\left. + \frac{2(C - S - 2r)}{(h - 2b_1)} + \frac{2h - 2b_1 - 2C - S_c - 4r}{C - S_c - 2r} + 2\right)$$
9	1	$$N = \frac{1}{\left(1 + \lambda\frac{h/2 - b_1 - w}{h/2 - b_1}\right)}\left(\frac{B - C}{2}2\left(\frac{1}{b_1 - k_f} + \frac{1}{h/2 - b_1}\right) + 2\left(\frac{h}{2} - b_1 - \frac{C}{2} + \frac{S_c}{2} + k_f\right)\times\right.$$ $$\left.\times\frac{2}{C - S_c - 2k_f} + \pi\left(1 + \left(\frac{2\ln h}{\pi}\right)^2 + \frac{C - S_c - 2k_f}{h - 2b_1}\right)\right)$$

$$F_{ст} = R_y((S_к(n - 1)w + 4m_к + 1{,}2n_к) + A_{р.ж}), \quad (2.62)$$

где R_y — расчетное сопротивление по пределу текучести;

$S_к$ — толщина стенки колонны;

n — число рядов болтов по вертикали;

w — расстояние между рядами болтов по вертикали;

$$m_к = \frac{C - 1{,}6r_к}{2} \text{ (рис. 2.8)}, \quad (2.63)$$

где C — расстояние между болтами по горизонтали;

$r_к$ — радиус закругления сечения колонны;

$$n_к = \frac{b_к - C}{2} \text{ (рис. 2.8)}, \quad (2.64)$$

где $b_к$ — ширина полки колонны;

$A_{р.ж}$ — площадь поперечного сечения ребер жесткости колонны;

$$A_{р.ж} = (b_к - S_к)\ t_{р.ж}, \quad (2.65)$$

где $t_{р.ж}$ — толщина ребра жесткости колонны.

В случае отсутствия ребер жесткости в колонне $t_{р.ж} = 0$ и, следовательно, в формуле (2.62) $A_{р.ж} = 0$. В формуле (2.62) $F_{ст}$ — величина усилия, которое необходимо приложить к участку стенки колонны для наступления на всем участке напряжений текучести.

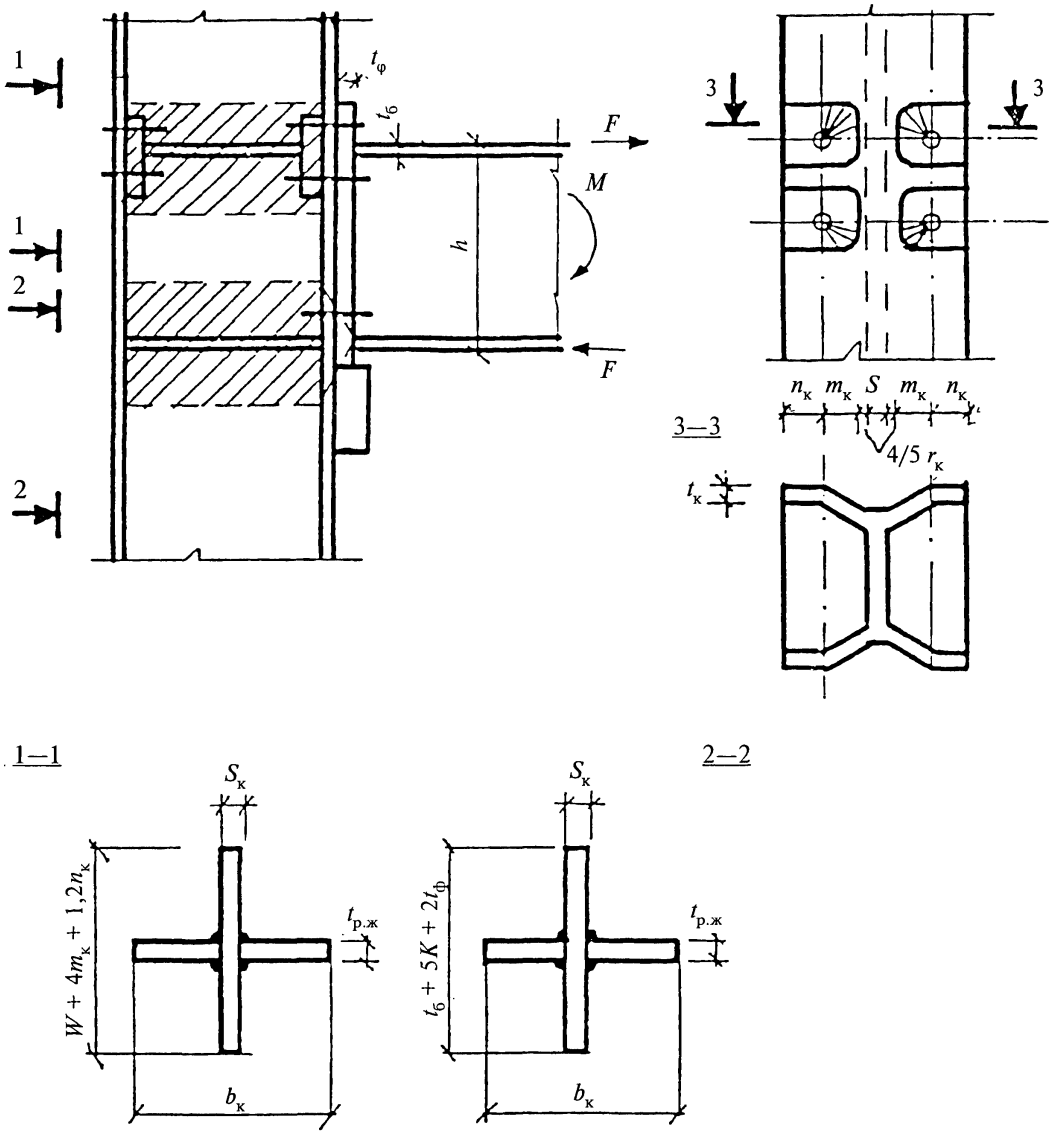


Рис. 2.8. Расчетные схемы работы участков стенки колонны с ребрами жесткости для определения предельного момента

Расчет предельного изгибающего момента выполняется по формуле:

$$M = F_{ст}^{р}(h_б - t_б). \qquad (2.66)$$

2.3.6. Расчет предельного изгибающего момента, воспринимаемого сжатой частью стенки колонны

А) Колонна с ребрами жесткости

Для расчета предельного усилия, которое необходимо приложить к участку стенки колонны с ребром жесткости для наступления на всем участке «эффективной» зоны напряжений текучести, предлагаем формулу:

$$F_{ст} = R_y(S_к(t_б + 5K + 2t_ф) + A_{р.ж}), \qquad (2.67)$$

где $K = t_к + r_к$;

R_y — предел текучести стали;

$t_б$ — толщина полки балки;

$S_к$ — толщина стенки колонны;

$t_ф$ — толщина фланца;

$A_{р.ж}$ — площадь поперечного сечения ребра жесткости;

$t_к$ — толщина полки колонны;

$r_к$ — радиус закругления профиля колонны.

Расчет величины изгибающего момента производим по формуле (2.66).

Б) Колонна без ребер жесткости

В качестве искомого усилия берется минимальное усилие, требуемое либо для наступления на всем сжатом участке «эффективной» зоны колонны напряжений текучести (формула (2.69) при $A_{р.ж} = 0$), либо для наступления потери ее устойчивости.

Запишем формулу для расчета критического усилия, при котором участок стенки — «эффективная» зона — теряет устойчивость от действия сжимающих усилий со стороны ригеля:

$$F_{сж} = 10750 \frac{S_к^3}{h_к - 2t_к - r_к} \sqrt{10R_y}. \qquad (2.68)$$

Расчет величины предельного изгибающего момента производится также по формуле (2.68) с подстановкой в нее минимального значения усилия из $F_{сж_1}^{с.т.}$ и $F_{сж_2}^{с.т.}$, выполненных по формулам (2.67) и (2.68).

2.3.7. Расчет предельного изгибающего момента, воспринимаемого участком стенки колонны, подверженным сдвигу

Расчетная схема участка колонны показана на рис. 2.3. В соответствии с ней значением предельного усилия сдвига будем считать величину, приводящую к достижению напряжений текучести в диагональном ребре и соответствующем участке стенки колонны. В запас прочности примем допущение, что стенка колонны и диагональное ребро вос-

принимают усилия отдельно. Тогда формула для расчета предельного усилия может быть записана следующим образом:

$$F_{ст} = t_{р.ж}(b_к - S_к)R_y \frac{(h_к - t_к) + (h_б - t_б)}{h_к - t_к} + \\ + \frac{1,04R_y h_к S_к}{\sqrt{3}} \left[0,66 \left(1 + \frac{(h_б - t_б)}{240 t_к} \right) + \right. \\ \left. + 2,624\chi \left(1 - \frac{0,024 t_к}{h_б - t_б} \right) \right], \qquad (2.69)$$

где

$$\chi = \left(1 + \frac{2r_к}{t_к} \right) \frac{b_к t_к^2}{S_к (h_к - t_к)(h_б - t_б)}. \qquad (2.70)$$

Если на участке колонны не имеется диагонального ребра, то в формуле (2.62) $t_{р.ж} = 0$. Расчет предельного изгибающего момента ведется по формуле (2.68) с подстановкой в нее значения усилия $F_{ст}$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рекомендации по применению сокращенного сортамента металлопроката в строительных стальных конструкциях. ЦНИИПроектстальконструкция им. Мельникова. М., 1991.

2. Sales programme of european and american series. Trade ARBED. Laxembourg, Edition, 1988.

3. Рекомендации по расчету, проектированию, изготовлению и монтажу фланцевых соединений стальных строительных конструкций. ВНИПИПромстальконструкция, ЦНИИПроектстальконструкция им. Мельникова. М., 1989.

4. СНиП II-23-81*. Стальные конструкции. М., 1991.

gost.e-ecolog.ru