ТИПОВЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ИЗДЕЛИЯ
И УЗЛЫ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

Серия 2.440-2

УЗЛЫ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ЗДАНИЙ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Выпуск 6

БОЛТОВЫЕ СОЕДИНЕНИЯ НА НАКЛАДКАХ СТЕНОК В УЗЛАХ БАЛОЧНЫХ КЛЕТОК И ПРИМЫКАНИЙ РИГЕЛЕЙ К КОЛОННАМ

**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 6

БОЛТОВЫЕ СОЕДИНЕНИЯ НА НАКЛАДКАХ СТЕНОК В УЗЛАХ БАЛОЧНЫХ КЛЕТОК И ПРИМЫКАНИЙ РИГЕЛЕЙ К КОЛОННАМ

Материалы для проектирования
и рабочие чертежи
с программным обеспечением

Разработаны

НИПИПромстальконструкция
Зам. директора института
_____ В.В. Каленов
подпись
Зав. сектором
_____ А.Б. Павлов
подпись
Старший научный сотрудник
_____ В.М. Френкель
подпись
Научный сотрудник
_____ К.Г. Вахрушев
подпись

Утверждены

Главным Управлением проектирования
и инженерных изысканий Госстроя
России, письмо от 22.12.93
№ 9-3-3/292
Введены в действие
НИПИПромстальконструкция
с 01.02.94, приказ от 12.01.94 № 2

ОБОЗНАЧЕНИЕ ДОКУМЕНТА	НАИМЕНОВАНИЕ	Стр.
Раздел 1	Пояснительная записка к программному обеспечению	3
Раздел 2	Методика расчета прочности, жесткости и деформативности болтовых соединений на накладках стенок	22

Взам. инв. №

Подпись и дата

Инв. № подл.

				2.440-2.6
Зам. дир.	Каленов			Содержание
Зав. сект.	Павлов			
Ст. н. сотр.	Френкель			
Н. сотр.	Вахрушев			

Стадия	Лист	Листов
Р		1

НИПИ Промстальконструкция

РАЗДЕЛ 1. ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА К ПРОГРАММНОМУ ОБЕСПЕЧЕНИЮ

1. ОБЩАЯ ЧАСТЬ

1.1. Настоящий выпуск содержит рабочие чертежи КМ узлов болтовых соединений балок к колоннам и вспомогательных балок к главным балкам на накладках стенок в балочных клетках межвидового назначения отапливаемых и неотапливаемых зданий.

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

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. Чертежи КМ».

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

1.5. Приведенные узлы позволяют унифицировать соединения элементов и сами элементы балочных клеток, 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 конструкций балочных клеток 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 балочных клетках, воспринимающих ста-

тическую нагрузку, в зданиях, эксплуатируемых в районах несейсмических и сейсмических до 9 баллов включительно.

2. КОНСТРУКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ

2.1. Разработанные узлы позволяют осуществить соединения балок любого модульного пролета из двутавров стальных горячекатаных с параллельными гранями полок типа Б и Ш по ГОСТ 26020—83 с колоннами и главными балками. Балки 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].

2.2. В зависимости от конструктивной формы разработанные узлы подразделяются на два типа:

- крепление балок к колоннам (рис. 1);
- крепление вспомогательных балок к главным балкам (рис. 2).

2.3. Опорные конструкции предусмотрены абсолютно жесткими и шарнирными.

2.4. По способу передачи внешних воздействий все узлы запроектированы срезными, в которых усилия передаются посредством работы болтов на срез и соединяемых элементов на смятие. Болты используются без контролируемого предварительного натяжения.

2.5. Соединения элементов в узлах предусмотрены:

- на высокопрочных болтах из стали 40Х «Селект» 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;

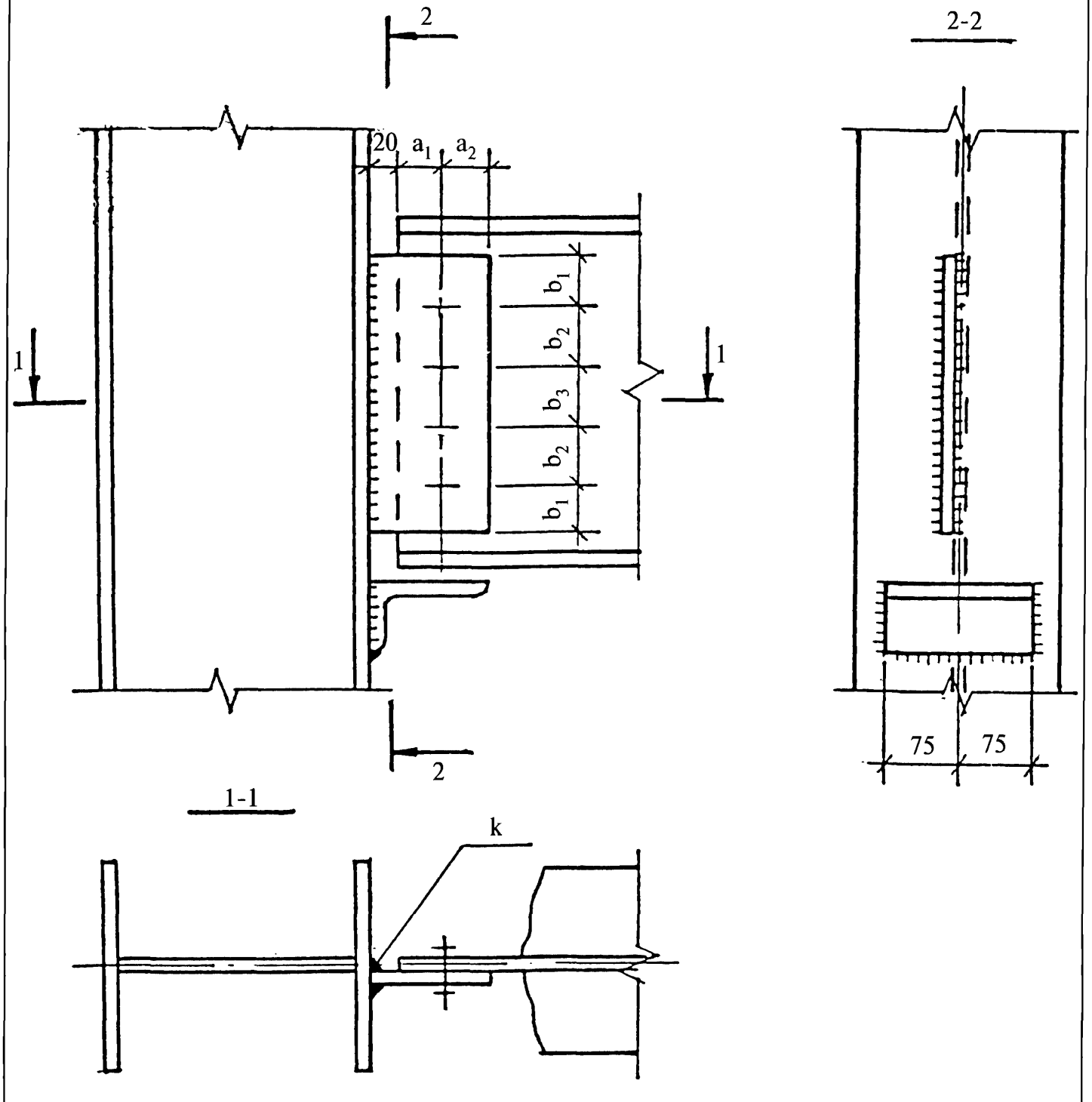


Рис. 1. Крепление балки к колонне

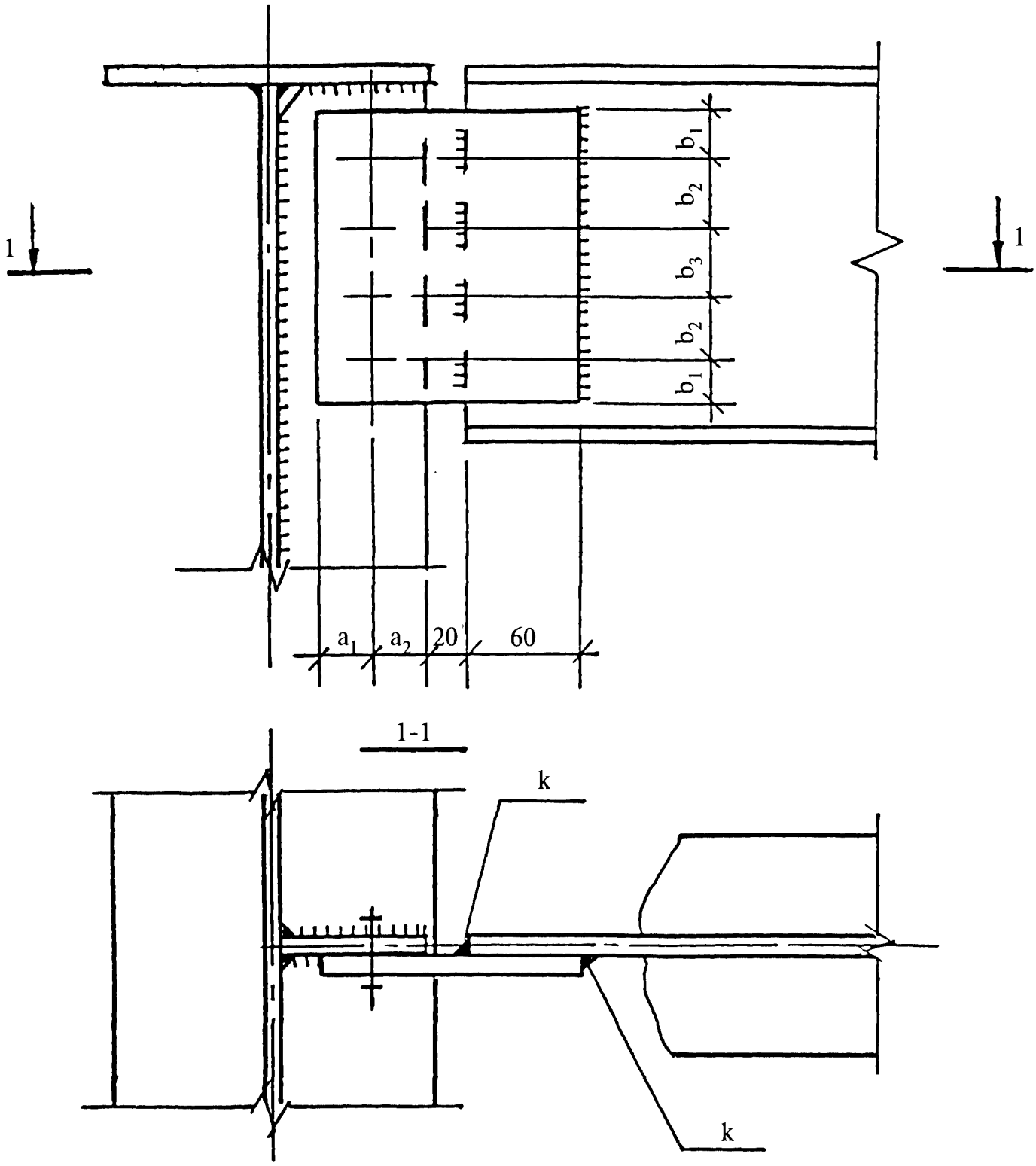


Рис. 2. Крепление вспомогательной балки к главной балке

- на болтах класса точности В по ГОСТ 1759.1—82 классов прочности 5.8 и 8.8 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 и 8, шайбы — по ГОСТ 18123—82.

2.6. Диаметры болтов приняты М20 и М24.

2.7. Диаметры отверстий для болтов М20 приняты от 20 до 23 мм, а для болтов М24 — от 24 до 28 мм.

3. ОСНОВНЫЕ РАСЧЕТНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

3.1. Нормативные и расчетные сопротивления сталей балок, накладок и сварных швов приняты в соответствии с требованиями [3].

3.2. Расчетные сопротивления болтов срезу и соединяемых элементов смятию, а также расчетные усилия, которые могут быть восприняты одним болтом соединения на срез или смятие, и возникающие при этих усилиях перемещения определены в соответствии с указаниями [4].

3.3. Расчет прочности узлов произведен в соответствии с требованиями [3].

3.4. Методика всех расчетов детально изложена в отчете по первому этапу настоящей работы.

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

4.1. Программа «SDVIG» предназначена для выполнения рабочих чертежей КМ болтовых соединений на накладках стенок балок к колоннам и вспомогательных балок к главным балкам с необходимой информацией о

прочностных, жесткостных и деформационных характеристиках соединений и нагрузках, воспринимаемых балочными конструкциями.

4.2. Расчет балочных клеток и подбор сечений элементов балочных клеток должен быть произведен заранее любыми известными методами.

4.3. В настоящее время для работы программы требуется около 620 кБ свободной оперативной памяти. Это достигается практически полным освобождением машины от внешних драйверов в AUTOEXEC.BAT и CONFIG.SYS и наличием DOS не ниже 5.0; NORTON COMMANDER может быть оставлен. В настоящий момент не осуществляется автоматическая загрузка NORTON COMMANDER после проведения расчетов.

4.4. Для запуска программы в работу необходимо воспользоваться файлом «START.BAT», расположенным в директории «SDVIG_R».

4.5. В файле «SHEAR.CFG» необходимо установить букву, соответствующую жесткому диску, на котором создана директория «SDVIG_R».

4.6. Исходными данными программы являются:

- тип узла (крепление балок к колоннам или вспомогательных балок к главным балкам);

- российские или европейские профили балок (характеристики в [см], [см^2], [см^3], [см^4] российских профилей приведены в файле «RS_SORT.DBF», европейских профилей в файле «E_SORT.DBF»);

- толщина накладки в [мм];

- стали ригелей или накладок (характеристики в [кгс/см^2] российских сталей приведены в файле «RP_STEEL.DBF», сталей накладок в файле

«RB_STEEL.DBF»; характеристики европейских сталей взяты по данным EUROCODE-3);

- количество накладок;
- класс прочности болтов: высокопрочные, 8.8 или 5.8;
- диаметр болтов [мм]: 24 или 20;
- диаметр отверстий в [мм];
- количество рядов болтов;
- количество болтов в ряду;
- размеры соединения в [мм];
- длина балки в [м];
- предельный задаваемый угол поворота в [рад] и число шагов;
- момент трения в [кН·м] (если момент трения отличен от нуля, то соединение работает по фрикционно-срезной схеме);
- задаваемый момент в [кН·м] для определения угла поворота соединения и усилия в выбранном болте при этом значении момента;
- вид опорной конструкции (абсолютно жесткая или шарнирная);
- катет сварного шва в [мм];
- коэффициенты для расчета сварных швов β_f и β_z;
- расчетное сопротивление сварных соединений R_{wf} в [кгс/см^2];
- коэффициенты условий работы сварного шва γ_{wf} и γ_{wz};
- коэффициент условий работы конструкции.

4.7. Корректировка исходных данных производится при помощи клавиш F2, F3 или F4.

4.8. Расчет соединения с выбранными исходными данными производится нажатием клавиши F6 или F7.

4.9. При нажатии клавиши F6 на экране высвечиваются координаты зависимости «угол поворота — изгибающий момент — поперечная сила» для болтовой группы. Отмечая курсором любую тройку чисел этой зависимости, вычисляем напряжения в сварных швах, накладке и стенке балки при выбранных значениях изгибающего момента и поперечной силы, воспринимаемых соединением, и соответствующего им угла поворота. Фактические напряжения должны быть меньше допустимых.

4.10. При помощи клавиши F7 можно посмотреть график общего вида зависимости «момент — угол поворота», график зависимости «момент — угол поворота» вместе с балочной линией и графики зависимости «момент — угол поворота» в безразмерных координатах:

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

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

где M и α — соответствующие момент и угол поворота;

M_{pl} — 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 BJORHOVDE, BROZZETTI, COLSON.

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

4.11. Результатами работы программы являются:

- рабочие чертежи КМ, выполненные в псевдографическом режиме, болтовых соединений на накладках стенок балок к колоннам и вспомогательных балок к главным балкам с необходимой информацией о балке,

накладке, болтах, опорной конструкции и сварных швах;

- координаты зависимости «угол поворота — изгибающий момент — поперечная сила» для болтовой группы;

- напряжения в сварных швах, накладке и стенке балки при выбранных значениях изгибающего момента, поперечной силы и соответствующего им угла поворота.

Результаты расчета заносятся в директорию «SDVIG_R\RES» в файлы типа «EX_III.RES». Директория «RES» должна быть обязательно создана перед проведением расчетов. Нумерация файлов производится автоматически последовательно по мере проведения расчетов.

4.12. Для узлов крепления балок к колоннам с жесткой опорной конструкцией, в которых вместо монтажного столика используется опорный столик, воспринимающий всю поперечную силу, результатами работы программы также являются следующие характеристики:

- характерные точки для построения балочной линии для условия постоянного уровня напряжений появления шарнира пластичности в балке (момент и угол поворота);

- значения опорного момента и угла поворота опорного сечения балки при предельной нагрузке, воспринимаемой балкой (за опорное принято сечение, проходящее через центр тяжести болтовой группы);

- максимальное значение угла поворота соединения;

- угол поворота и усилие на отмеченный расчетный болт при заданном моменте;

- 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.

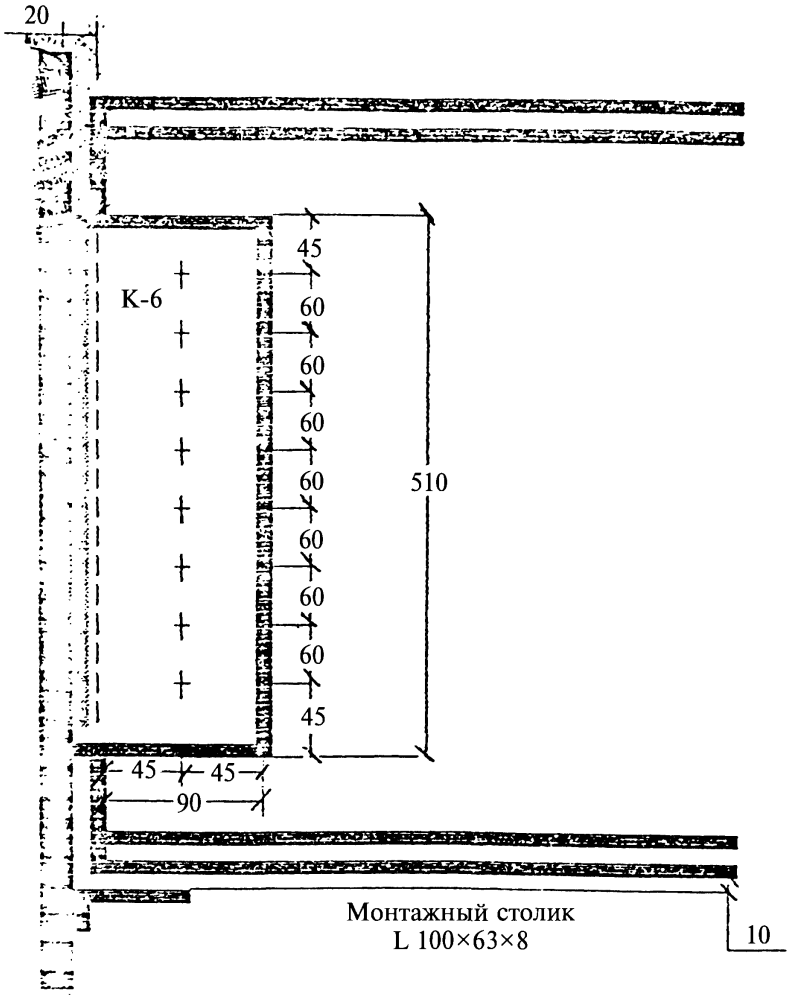
Все эти характеристики можно просмотреть при помощи клавиши F5.

5. ПРИМЕР РАСЧЕТА 1 УЗЛА КРЕПЛЕНИЯ БАЛКИ К КОЛОННЕ

Балка			Накладка		
профиль	сталь	длина	толщина	сталь	количество
80Б1	С345-3	8	8	С345-3	1

Болты					
ряды	кол-во в ряду	класс прочности	диаметр	отверстие	расчетный
1	8	высокопрочные	20	22	1

Опорная конструкция	жесткая
Коэффициенты для расчета сварных швов:	
beta_f	0,90
beta_z	1,05
Расчетное сопротивление R_{wf}	2450
Коэффициенты условий работы сварного шва:	
gamma_wf	1,00
gamma_wz	1,00
Коэффициент условий работы конструкции	0,90



(Колонна условно не показана)

Характеристики

Балочная линия:	
- момент, кН·м	1807,770
- угол поворота, рад	0,0115
Опорный момент, кН·м	71,075
Угол поворота, рад:	
- опорного сечения	0,0113
- предельный	0,0190
- при заданном моменте	0,0022
Усилие на 1-й болт, кН	0,000
Распределенная нагрузка, кН/м	234,866
Приведенная нагрузка	1,039

Зависимость «момент — угол поворота»

Угол поворота, рад	Момент, кН·м	Поперечная сила, кН
0,0000	0,000	862,167
0,0010	0,000	862,167
0,0020	0,000	862,167
0,0030	5,142	856,585
0,0040	16,275	823,227
0,0050	28,820	756,041
0,0060	37,711	709,306
0,0070	47,308	652,862
0,0080	54,723	581,974
0,0090	61,545	503,677
0,0100	65,749	483,964
0,0110	69,953	463,017
0,0120	73,944	440,632
0,0130	76,341	416,592
0,0140	78,137	390,592
0,0150	79,933	362,226
0,0160	81,729	330,850
0,0170	83,581	295,527
0,0180	85,547	254,645
0,0190	87,512	204,841

Проверка на прочность

Угол поворота — 0,0110 рад
Изгибающий момент — 69,953 кН·м
Поперечная сила — 463,017 кН

Напряжения, МПа	Фактические	Допустимые
В сварных швах:		
- по металлу шва	233,685	216,237
- по металлу границы сплавления	200,301	198,585
В накладке	304,016	300,083
В стенке балки:		
- нормальные	48,729	282,432
- касательные	78,227	163,810

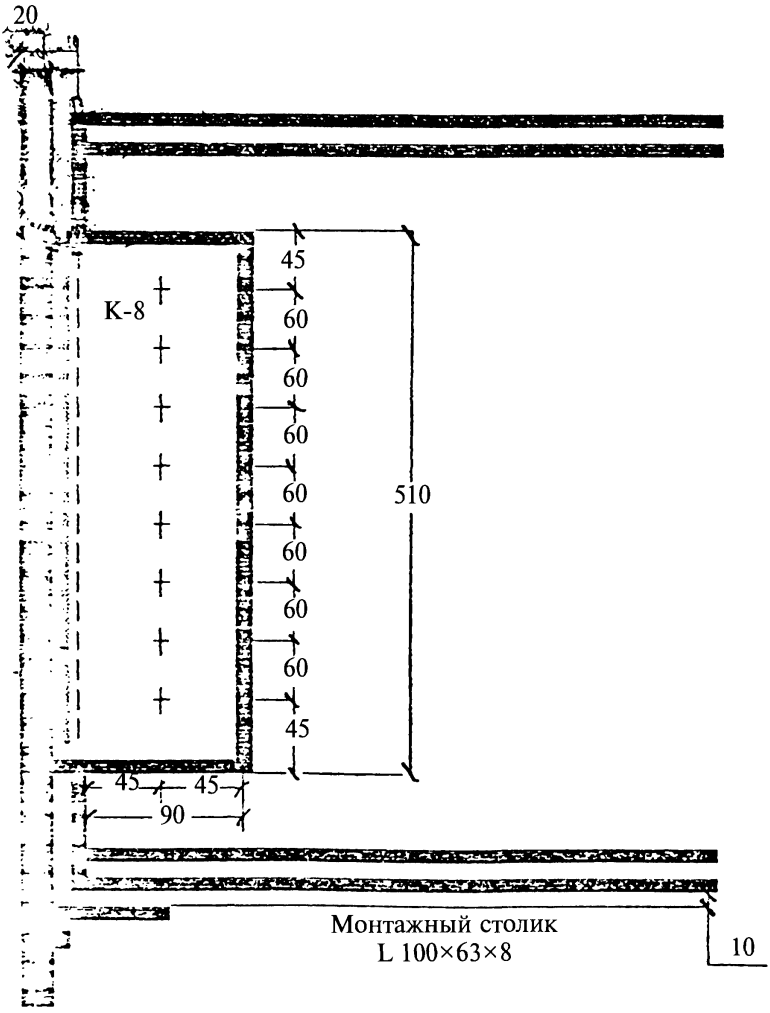
При угле поворота опорного сечения 0,011 рад фактические напряжения в сварных швах и накладке превосходят допустимые. Поэтому увеличиваем катеты сварных швов до 8 мм и толщину накладки до 10 мм (пример 2).

6. ПРИМЕР РАСЧЕТА 2 УЗЛА КРЕПЛЕНИЯ БАЛКИ К КОЛОННЕ

Балка			Накладка		
профиль	сталь	длина	толщина	сталь	количество
80Б1	С345-3	8	10	С345-3	1

Болты					
ряды	кол-во в ряду	класс прочности	диаметр	отверстие	расчетный
1	8	высокопрочные	20	22	1

Опорная конструкция	жесткая
Коэффициенты для расчета сварных швов:	
beta_f	0,90
beta_z	1,05
Расчетное сопротивление R_{wf}	2450
Коэффициенты условий работы сварного шва:	
gamma_wf	1,00
gamma_wz	1,00
Коэффициент условий работы конструкции	0,90



(Колонна условно не показана)

Характеристики

Балочная линия:	
- момент, кН·м	1807,770
- угол поворота, рад	0,0115
Опорный момент, кН·м	83,297
Угол поворота, рад:	
- опорного сечения	0,0112
- предельный	0,0170
- при заданном моменте	0,0022
Усилие на 1-й болт, кН	0,000
Распределенная нагрузка, кН/м	236,394
Приведенная нагрузка	1,046

Зависимость «момент — угол поворота»

Угол поворота, рад	Момент, кН·м	Поперечная сила, кН
0,0000	0,000	992,000
0,0010	0,000	992,000
0,0020	0,000	992,000
0,0030	5,584	986,282
0,0040	17,672	952,201
0,0050	31,294	884,073
0,0060	43,075	809,984
0,0070	53,812	742,361
0,0080	62,698	676,601
0,0090	69,864	604,067
0,0100	77,031	514,242
0,0110	82,285	450,858
0,0120	86,466	416,432
0,0130	90,377	378,152
0,0140	93,723	334,697
0,0150	96,570	283,698
0,0160	98,719	219,970
0,0170	100,912	125,416

Проверка на прочность

Угол поворота — 0,0110 рад
Изгибающий момент — 82,285 кН·м
Поперечная сила — 450,858 кН

Напряжения, МПа	Фактические	Допустимые
В сварных швах:		
- по металлу шва	192,449	216,237
- по металлу границы сплавления	164,956	198,585
В накладке	266,913	300,083
В стенке балки:		
- нормальные	57,320	282,432
- касательные	76,173	163,810

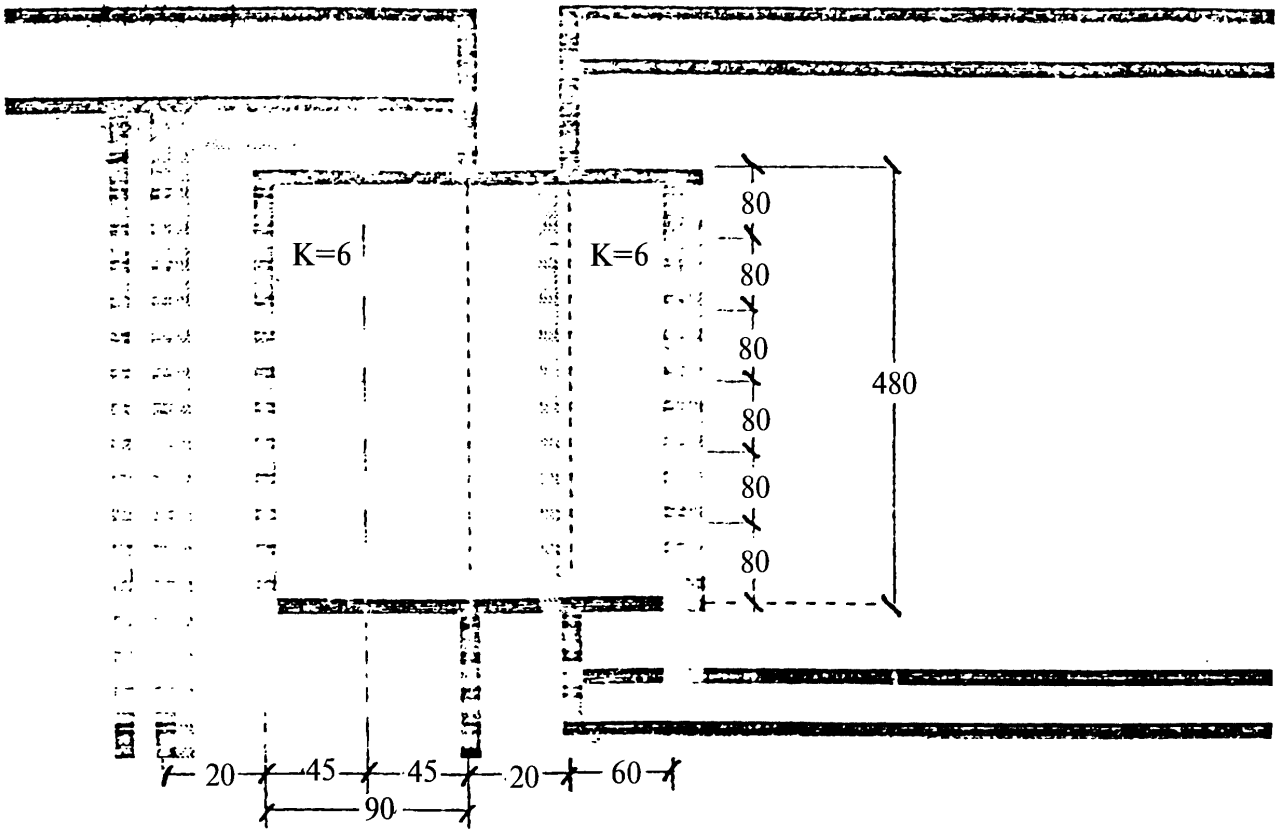
7. ПРИМЕР РАСЧЕТА УЗЛА КРЕПЛЕНИЯ ВСПОМОГАТЕЛЬНОЙ БАЛКИ К ГЛАВНОЙ БАЛКЕ

Вспомогательная балка		
профиль	сталь	длина
60Б1	С345-3	6

Накладка к вспомогат. балке			Накладка к главной балке		
толщина	сталь	количество	толщина	сталь	количество
8	С345-3	1	8	С345-3	1

Болты					
ряды	кол-во в ряду	класс прочности	диаметр	отверстие	расчетный
1	5	8.8	20	22	1

Опорная конструкция	жесткая
Коэффициенты для расчета сварных швов:	
beta_f	0,90
beta_z	1,05
Расчетное сопротивление R_{wf}	2450
Коэффициенты условий работы сварного шва:	
gamma_wf	1,00
gamma_wz	1,00
Коэффициент условий работы конструкции	0,90


K=6
K=6
80
80
80
80
80
80
480
20
45
45
20
60
90

Зависимость «момент — угол поворота»

Угол поворота, рад	Момент, кН·м	Поперечная сила, кН
0,0000	0,000	450,000
0,0010	0,000	450,000
0,0020	0,000	450,000
0,0030	0,000	450,000
0,0040	3,277	447,077
0,0050	7,023	436,415
0,0060	10,769	417,357
0,0070	15,217	388,672
0,0080	18,943	359,711
0,0090	21,211	343,091
0,0100	23,479	324,292
0,0110	25,746	302,909
0,0120	28,014	278,354
0,0130	30,281	249,679
0,0140	32,549	215,250
0,0150	34,816	171,653
0,0160	36,606	108,314
0,0170	37,178	91,905
0,0180	37,743	72,416
0,0190	38,307	44,894

Проверка на прочность

Угол поворота — 0,0110 рад
Изгибающий момент — 25,746 кН·м
Поперечная сила — 302,909 кН

Напряжения, МПа	Фактические	Допустимые
Вспомогательная балка		
В сварных швах:		
- по металлу шва	58,996	216,237
- по металлу границы сплавления	50,568	198,585
В накладке	165,130	300,083
В стенке балки:		
- нормальные	-4,829	282,432
- касательные	74,869	163,810

РАЗДЕЛ 2. МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПРОЧНОСТИ, ЖЕСТКОСТИ И ДЕФОРМАТИВНОСТИ БОЛТОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ НА НАКЛАДКАХ СТЕНОК

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

Для характеристики поведения соединений принято использовать зависимость между моментом «М», 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 «М—α» в определенной точке. Тангенс угла наклона касательной к диаграмме «М—α» при $\alpha = 0$ называется начальной жесткостью соединения К.

Соединения А и Б в предельном состоянии (обрыв зависимости «М—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 ($\alpha_{а,в}$), при существенно меньшей прочности ($М_в$).

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

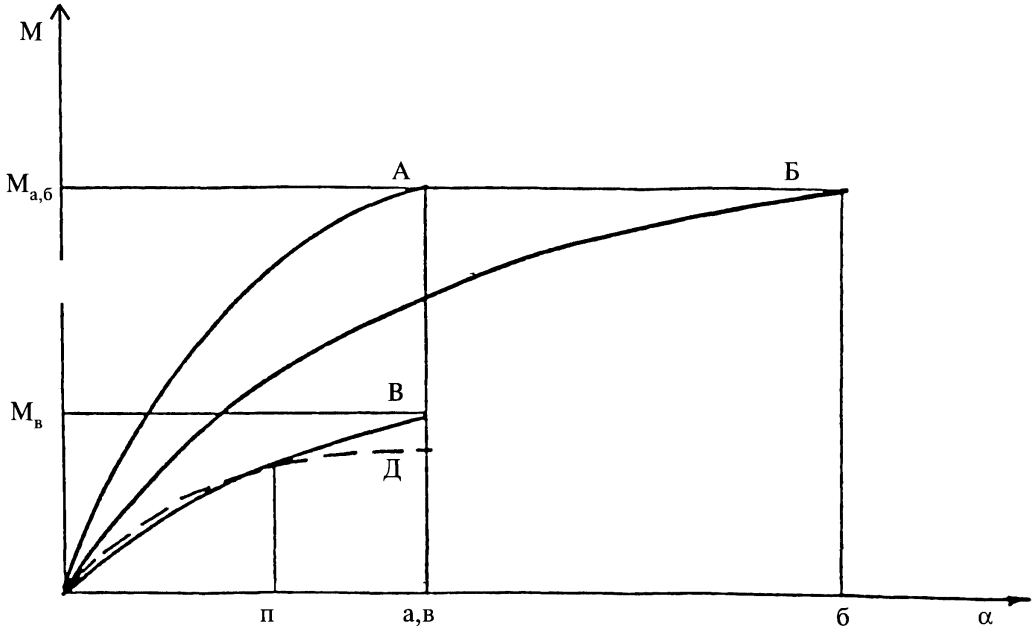


Рис. 1.1. Диаграммы «момент — угол поворота» соединений различной конструктивной формы

Обычно зависимость «М—α» характеризует жесткость всех элементов, составляющих соединение. Поэтому условно зависимость «М—α» можно представить как сумму зависимостей, характеризующих работу отдельных элементов узла. На рис. 1.2 показаны диаграммы «М—α» фланцевого соединения (Ф.С.) с идеально жесткой опорной частью и отдельно —опорной части реальной колонны, которые вместе дают диаграмму «М—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 количество 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 «М—α», удобно осуществлять с помощью балочной линии.

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

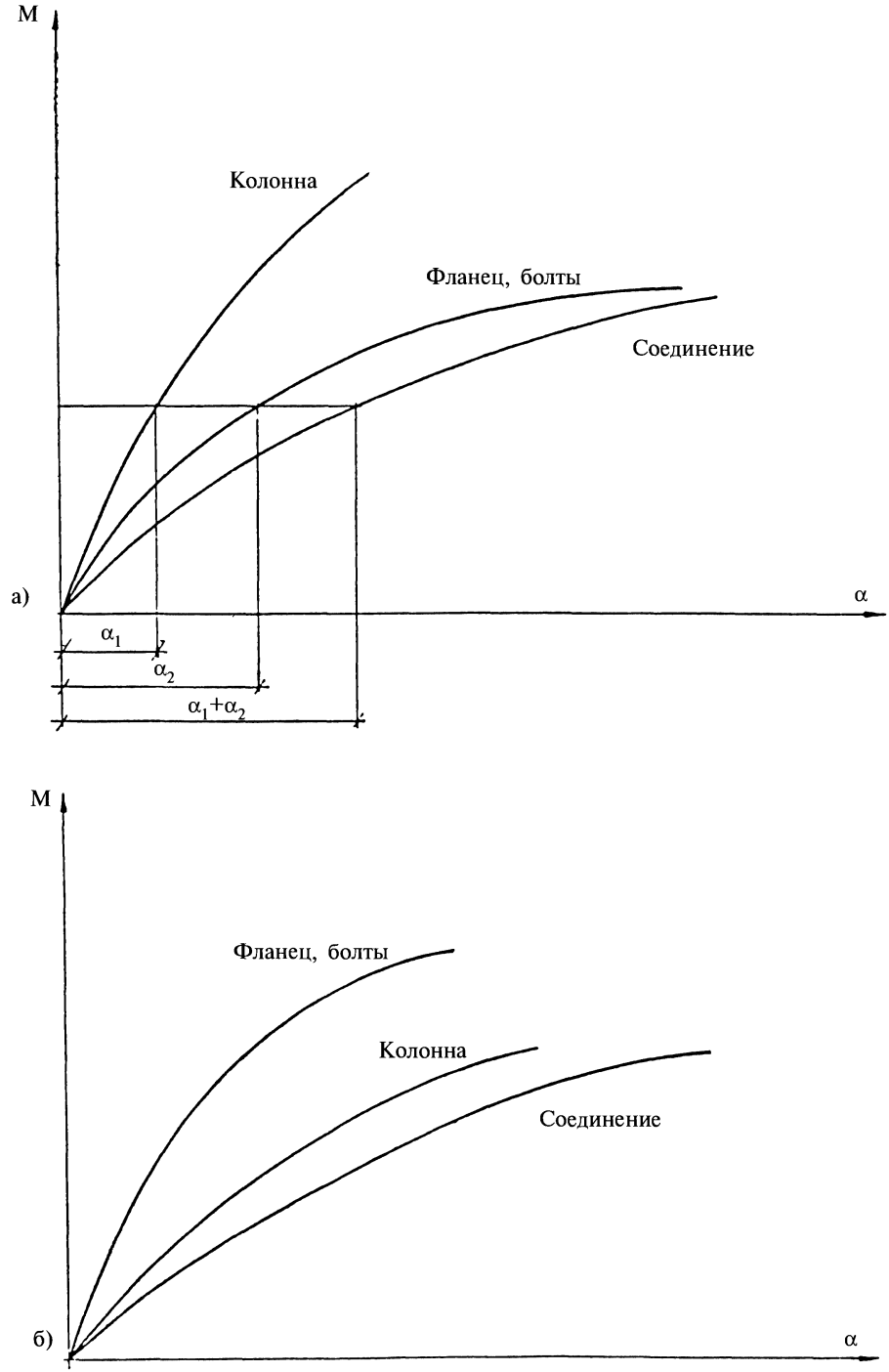


Рис. 1.2. Вклад опорной части колонны в деформативность изгибаемого фланцевого соединения

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

при жесткой заделке

$$M_O = \frac{qL^2}{12};\ \alpha_O = 0 \qquad (1.1)$$

при шарнирном опирании

$$M_O = 0;\ \alpha_O = \frac{qL^3}{24EI} \qquad (1.2)$$

Поскольку при работе балочной конструкции происходит совместный поворот соединения и балочного конца, то координаты точки пересечения кривой «M—α» с балочной линией есть величина момента и угла поворота на опорах [5].

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

$$q_{yc}=8M_y/L^2, \qquad (1.3)$$

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

$$M_y=\sigma_y W, \qquad (1.4)$$

где σ_y — предел текучести стали;

W — момент сопротивления балки.

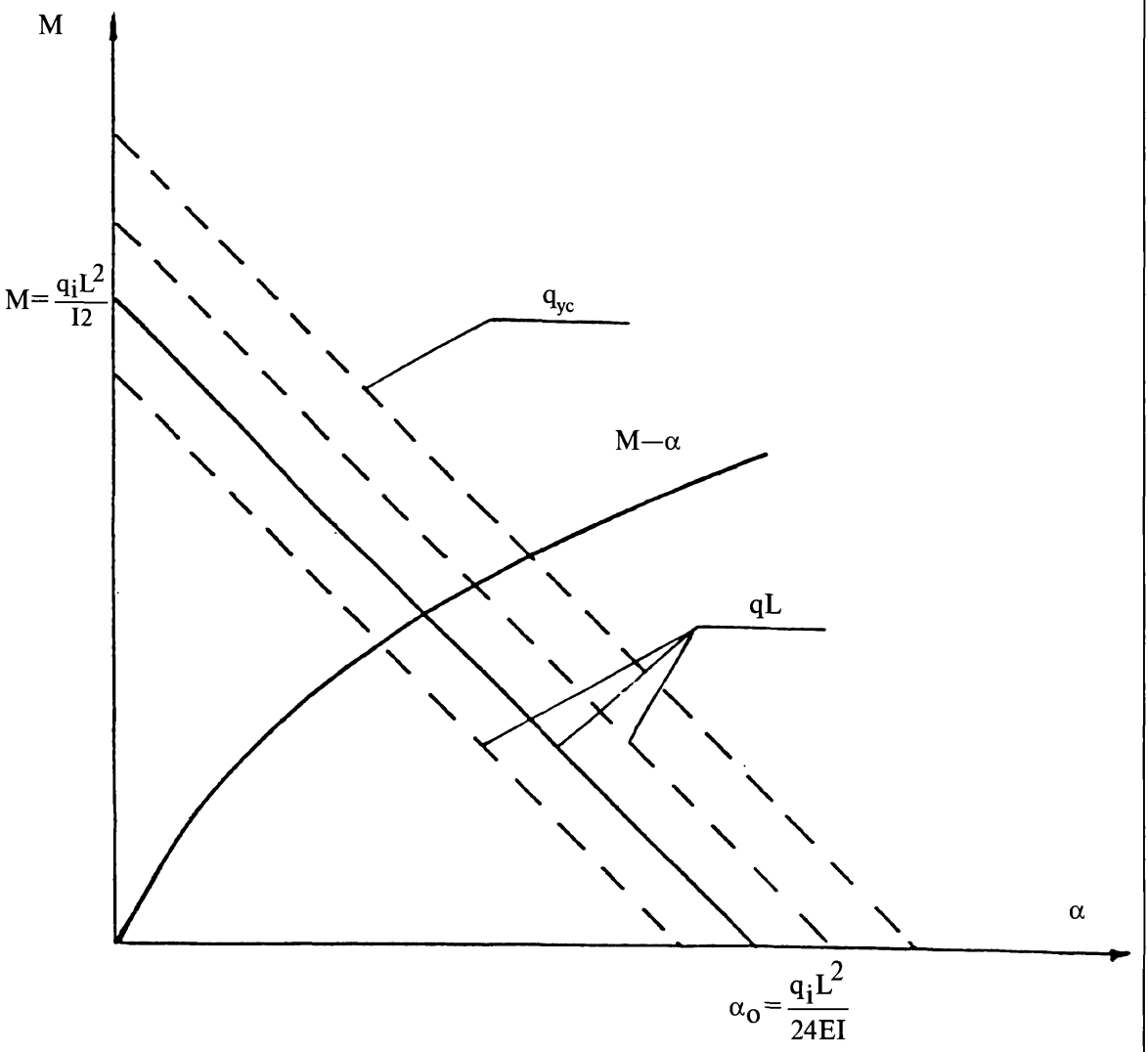


Рис. 1.3. Кривая «M—α» соединения и балочная линия для постоянной нагрузки

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

$$q_{ye}=12M_y/L^2, \qquad (1.5)$$

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_o (в т. P) до $\alpha_o/2$ (в т. Q), предельная нагрузка при этом увеличивается от 8 M_y/L до $16M_y/L^2$ [5].

Выражение балочной линии для участка RQ имеет вид:

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

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.

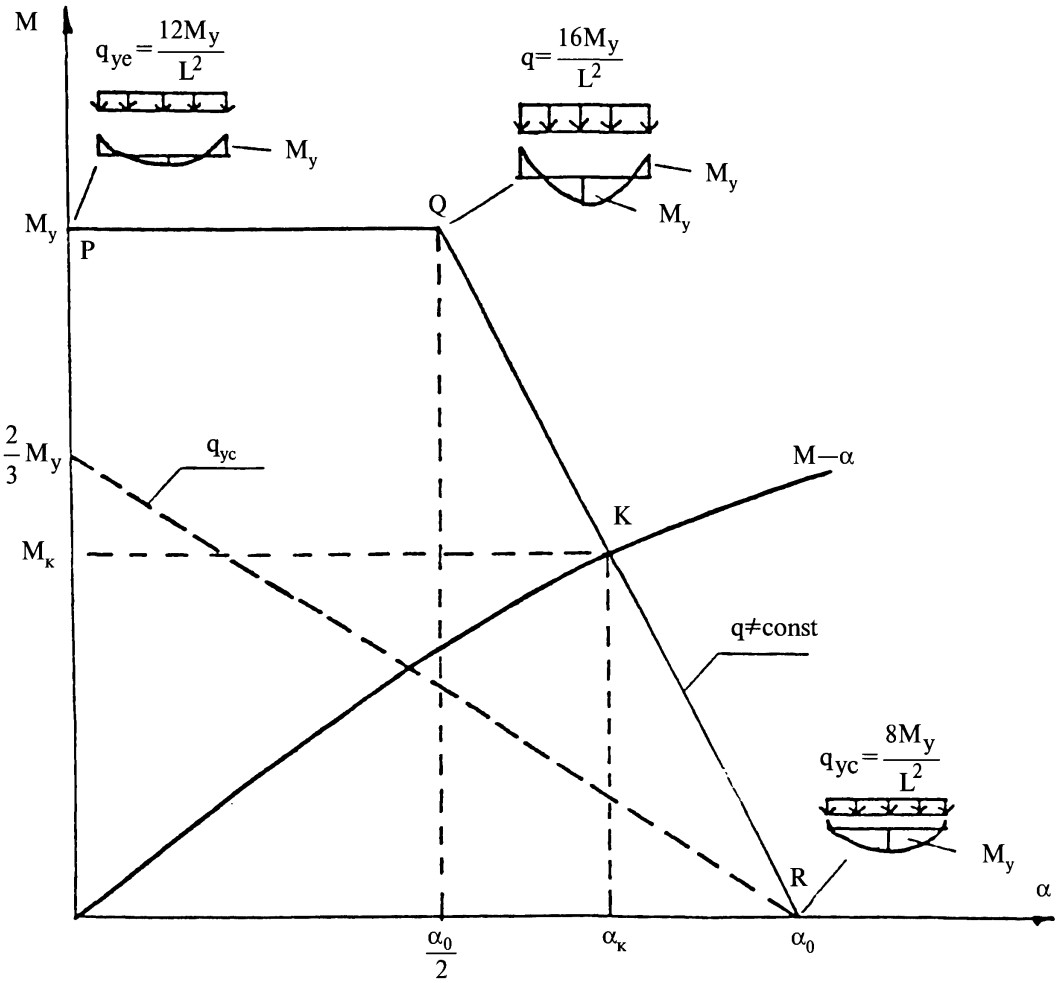


Рис. 1.4. Кривая «M—α» соединения и балочная линия PQR, соответствующая постоянному уровню напряжений текучести

При жесткой заделке (т. P) предельная нагрузка составляет 12 M_y/L^2. 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 $16M_y/L^2$.

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. РАСЧЕТ ПРОЧНОСТИ, ЖЕСТКОСТИ И ДЕФОРМАТИВНОСТИ СОЕДИНЕНИЙ НА НАКЛАДКАХ СТЕНОК

2.1. Построение зависимости «момент — угол поворота»

Рассмотрим деформативность срезного соединения от действия изгибающего момента.

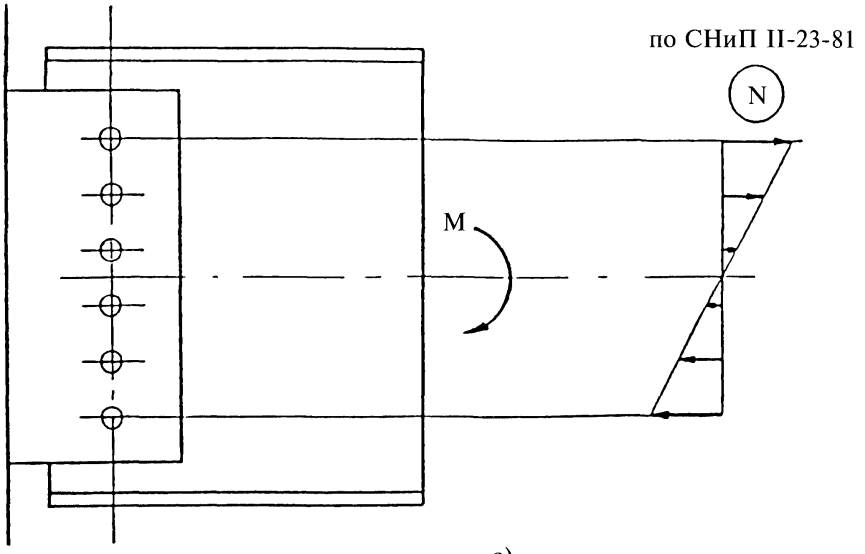
Основной вклад (90—95 %) в общую изгибную деформацию срезного соединения вносят деформации среза болтов, смятия соединяемых элементов, подвижки за счет зазора. Поэтому деформациями от изгиба стенки балки и накладки пренебрегаем.

В месте контакта болтов со стенками отверстий перемещения соединяемых элементов складываются из перемещений смятия стенки балки и накладки (накладок) и перемещений сдвига и изгиба стержней болтов.

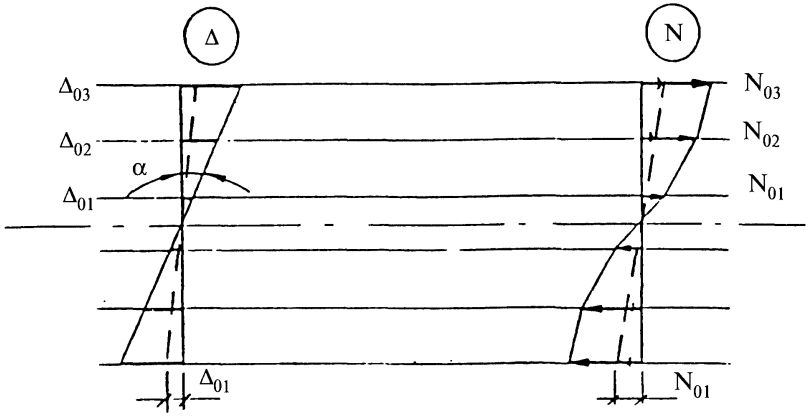
Одним из основных вопросов, возникающих при создании аналитической модели работы срезного соединения и построении зависимости М—α, является схема распределения усилий между болтами.

В действующих нормах проектирования (СНиП II-23-81) говорится: «11.9. При действии на соединение момента, вызывающего сдвиг соединяемых элементов, распределение усилий на болты следует принимать пропорционально расстояниям от центра тяжести соединения до рассматриваемого болта». Аналогичный подход к распределению усилий на болты от действия момента использован в Рекомендациях по проектированию работающих на сдвиг болтовых соединений стальных строительных конструкций. То есть при однорядном расположении болтов эпюра усилий имеет треугольный вид (рис. 2.1,а).

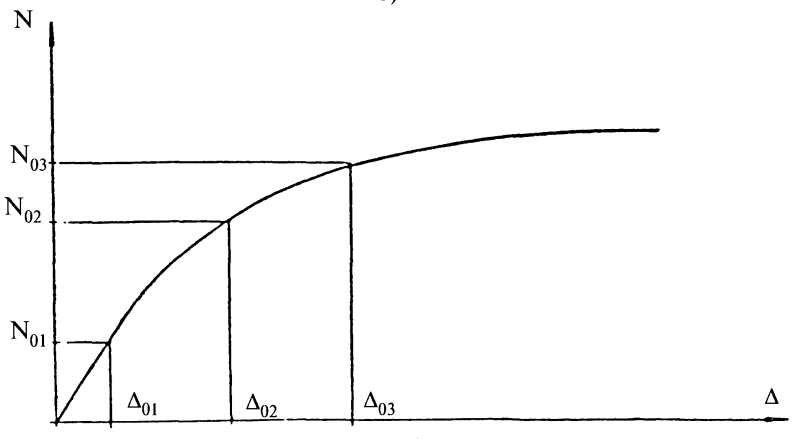
Предлагаемый подход принципиально отличается от выше описанного



а)



б)



в)

Рис. 2.1. К распределению усилий между болтами от действия момента

тем, что основывается на реальных нелинейных зависимостях между усилиями сдвига N и перемещениями Δ, полученных экспериментально на одноболтовых образцах.

На рис. 2.1,б представлена в общем виде зависимость N—Δ, соответствующая реальной деформативности одноболтового соединения от смятия соединяемых элементов и среза болтов. До значения N_{01} соединение работает упруго. Затем с увеличением приходящегося на соединение усилия происходит нелинейный рост деформаций, соответствующий упруго-пластической и пластической работе. Если перемещения соединяемых элементов в месте установки наиболее удаленного от центра вращения болта не превышают Δ_{01}, то усилия сдвига, воспринимаемые болтами, пропорциональны расстояниям болтов от центра вращения. Эпюра распределения усилий имеет треугольный вид и соответствует СНиПу.

В реальных конструкциях срезные соединения проектируются шарнирными и следовательно в соединении предполагаются значительные повороты. Анализ реальных углов поворота рассматриваемых соединений при их работе в конструкции и экспериментальные исследования показывают, что перемещения соединяемых элементов в месте установки крайних и близких к ним болтов превышают упругие перемещения. Следовательно, усилия сдвига N, воспринимаемые болтами, непропорциональны расстояниям от центра тяжести соединения до рассматриваемого болта.

При этом перемещения соединяемых элементов (балка относительно накладки) в пространстве происходят практически без деформаций формы самих элементов. Следовательно, перемещения точек поворачиваемого тела Δ пропорциональны расстояниям до центра вращения. На рис. 2.1,в представлены линейная эпюра перемещений Δ и нелинейная эпюра возникающих при этом усилий N. Рассмотрим алгоритм построения аналитической зависимости «момент — угол поворота (M—α)», в основе которого лежит выше-

изложенный подход.

Построение кривой М—α для многоболтовых срезных соединений при взаимном сдвиге балки и накладок (рис. 2.2) является статически неопределимой задачей с нелинейной зависимостью между усилиями сдвига, приходящимися на болт, и возникающими при этом перемещениями соединяемых элементов.

При решении данной задачи были приняты следующие гипотезы:

- перемещения и углы поворота стенки балки и накладок от изгиба в зоне примыкания балки равны нулю (сечение 1—1 на рис. 2.2);

- центр вращения соединения совпадает с центром симметрии группы болтов (точка 0) на рис. 2.2;

- усилия, действующие на каждый болт соединения, и вызванные ими перемещения направлены перпендикулярно линии, соединяющей центр отверстия для болта с центром вращения соединения;

- перемещения в месте контакта болтов со стенками отверстия пропорциональны расстояниям от центров болтов до центра вращения соединения r.

Применим пошаговый метод решения задачи.

На первом шаге задаем какой-либо угол поворота соединения.

Согласно четвертой гипотезе в месте контакта каждого болта со стенками отверстия возникнут перемещения Δ.

Для i-го болта

$$\Delta_i=\alpha\cdot r_i\,. \qquad (2.1)$$

Затем по вычисленным значениям для каждого болта определяем величины воспринимаемых болтом усилий — N_{itc}.

Перемещения в месте контакта болта со стенками отверстия складываются из перемещений смятия каждого соединяемого элемента и перемеще-

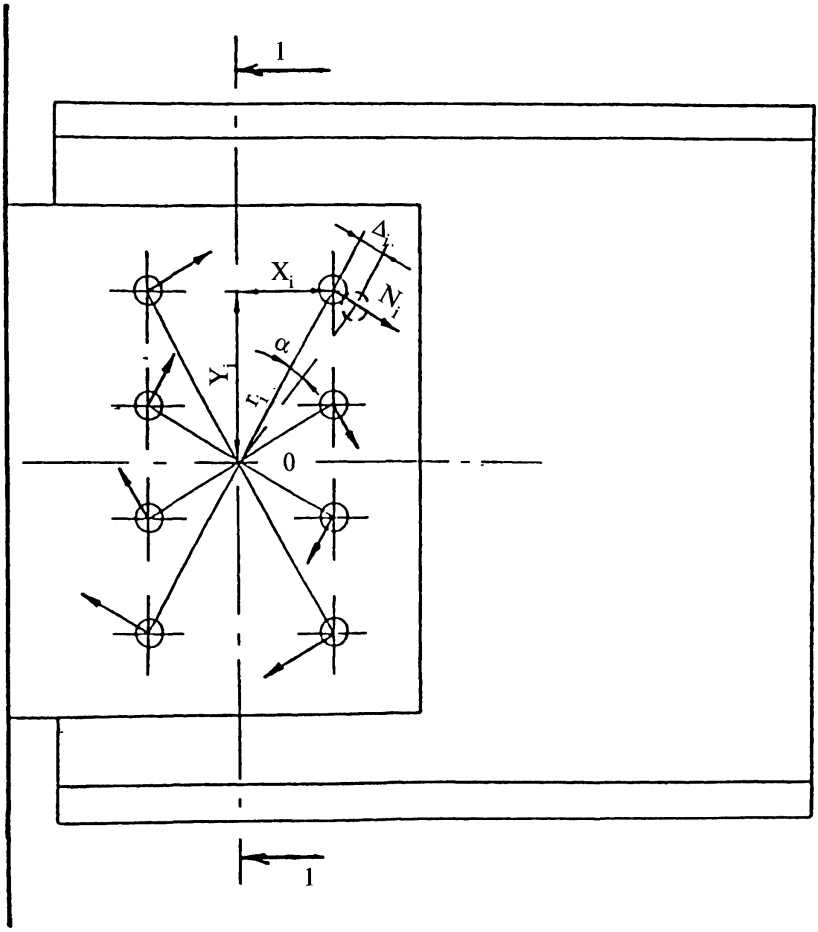


Рис. 2.2. Схема распределения усилий между болтами в срезном соединении

ний сдвига и изгиба стержня болта.

$$N_c = f_{\Delta p} \cdot \gamma_a \cdot \sigma_u \cdot d_в \cdot \gamma_t \text{ [4]}, \qquad (2.2)$$

где $f_{\Delta p}$ — коэффициент, учитывающий перемещения смятия каждого соединяемого элемента.

На рис. 2.3 приведена кусочно-линейная зависимость коэффициента $f_{\Delta p}$ от перемещений смятия Δ_p [4].

$$\gamma_a = \begin{cases} 0{,}2\dfrac{a}{\alpha} + 0{,}4 & \text{при } 1{,}5d < a < 3d \\ 1{,}0 & \text{при } a > 3d \end{cases} \qquad (2.3)$$

a — расстояние от центра отверстия до ближайшего края элемента;

d — диаметр отверстия для болта;

σ_u — временное сопротивление стали соединяемого элемента (кгс/мм);

$$\gamma_t = \begin{cases} t & \text{при } t \le 20 \text{ мм} \\ -0{,}025t^2 + 3t - 20 & \text{при } 20 < t < 30 \text{ мм} \\ 25 & \text{при } t \ge 30 \text{ мм} \end{cases} \qquad (2.4)$$

t — толщина элемента.

Кусочно-линейные зависимости между усилиями N_c с перемещениями сдвига и изгиба стержней для болтов М20 и М24 классов прочности 5.8, 8.8 и высокопрочных приведены на рис. 2.4 — 2.6.

Складывая зависимости (2.2) и приведенные на рис. 2.4 — 2.6 по Δ при постоянном N_c, получаем суммарную зависимость усилия N_c от перемеще-

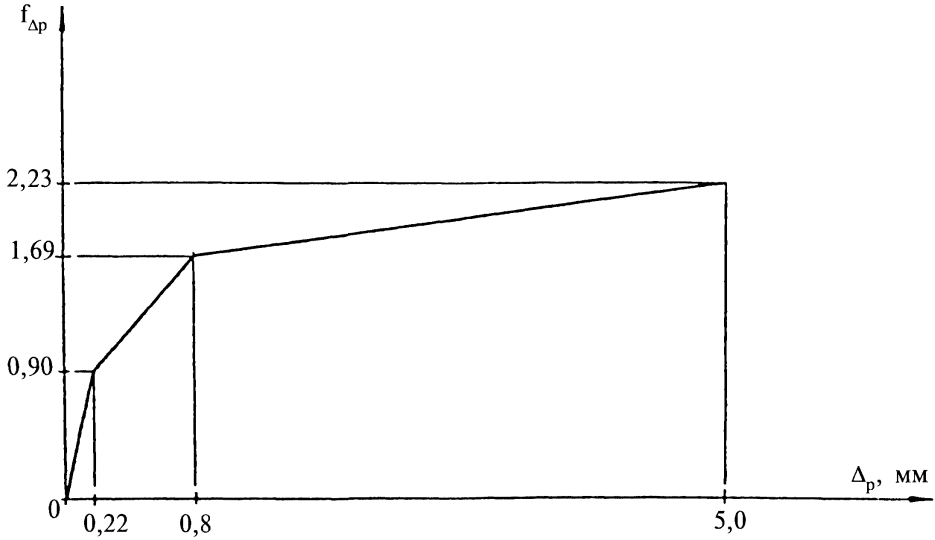


Рис. 2.3. Зависимость коэффициента $f_{\Delta p}$ от перемещений смятия Δ_p

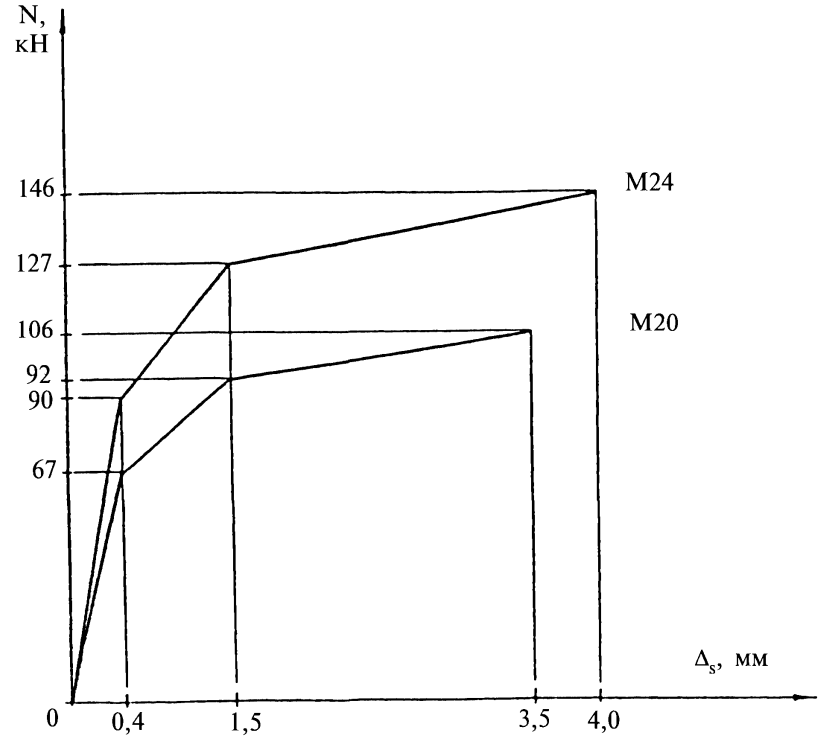


Рис. 2.4. Зависимости между усилиями сдвига и перемещениями сдвига и изгиба стержней болтов класса прочности 5.8

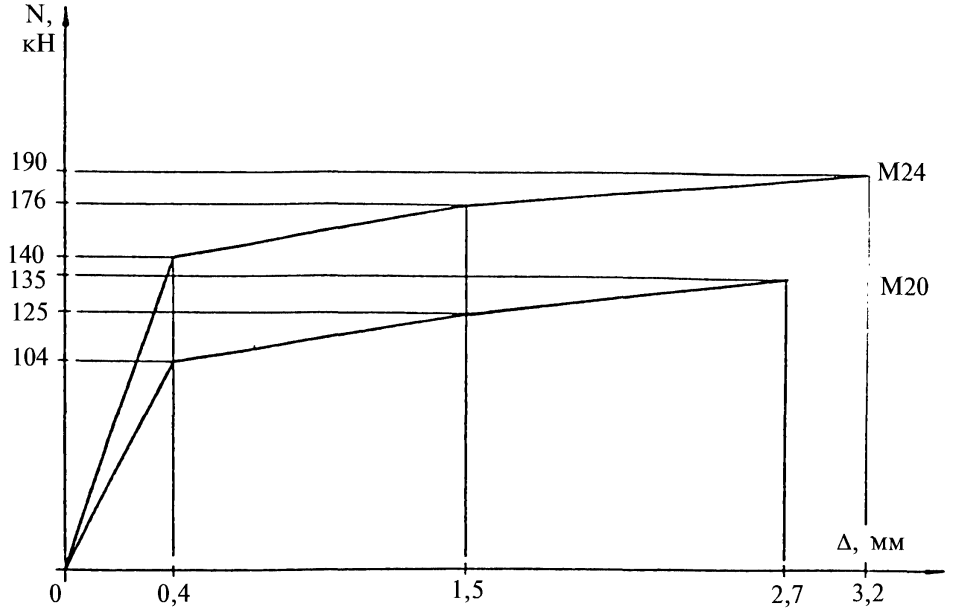


Рис. 2.5. Зависимости между усилиями сдвига и перемещениями сдвига и изгиба стержней болтов класса прочности 8,8

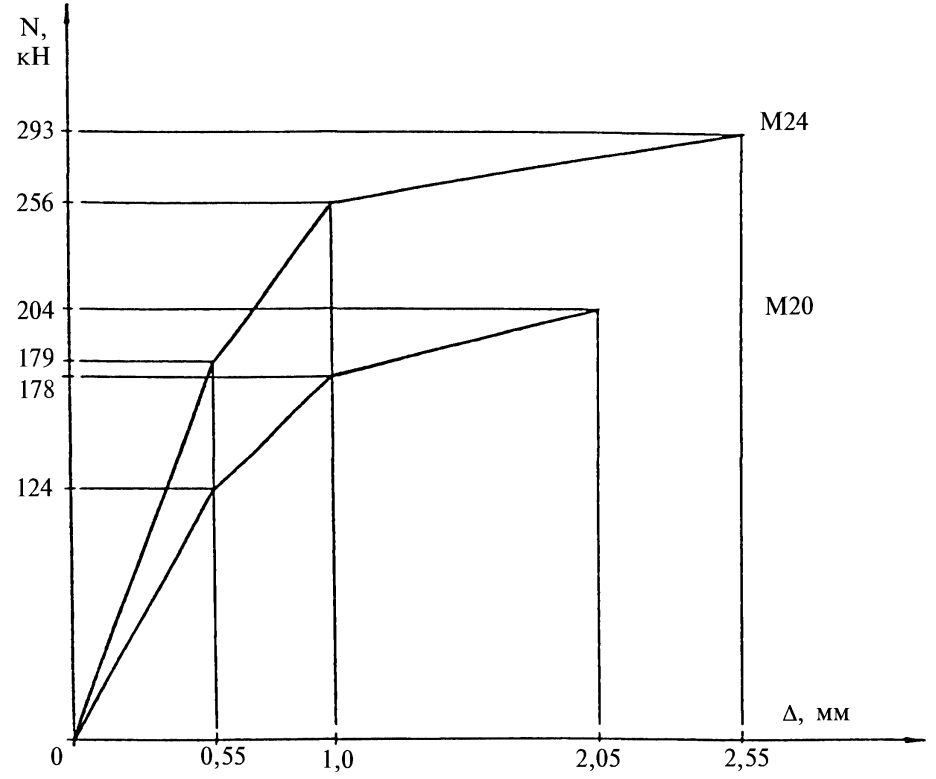


Рис. 2.6. Зависимости между усилиями сдвига и перемещениями сдвига и изгиба стержней высокопрочных болтов

ний в месте контакта болта со стенками отверстия.

Полученные значения усилий для каждого болта $N_{iтс}$ умножаем на расстояния от центра отверстия для болта до центра вращения соединения и вычисляем часть момента, воспринимаемую каждым болтом:

$$M_{iтс}=N_{iтс}\cdot r_i \qquad (2.5)$$

Затем складываем все вычисленные значения M для каждого болта и определяем момент, передаваемый всеми болтами соединения при заданном угле поворота:

$$M_{тс} = \sum_{i=1}^{n} M_{iтс} = f(\alpha). \qquad (2.6)$$

Указанная процедура повторяется для любого числа заданных углов поворота. Для каждого из них вычисляем значение момента, после чего по полученным точкам строим кривую M—α.

2.2. Проверка прочности болтов на срез и соединяемых элементов на смятие

Обозначим значения усилий в наиболее нагруженном болте от действия изгибающего момента и поперечной силы соответственно N_M и N_Q. Равнодействующая этих усилий R должна быть меньше минимального расчетного усилия N_B из усилий, воспринимаемых болтами на срез N_{BS} и соединяемыми элементами на смятие N_{Bp}:

$$R=\sqrt{N_M^2+N_Q^2} \le N_B, \qquad (2.7)$$

где $N_B = \min(N_{BS}, N_{Bp})$;

N_{BS} и N_{Bp} согласно рекомендациям [4] определяем по формулам:

$$N_{BS}=R_{BS}\cdot\gamma_{B1}\cdot A\cdot n_S; \tag{2.8}$$

$$N_{Bp}=R_{Bp}\cdot\gamma_{B1}\cdot\gamma_{B2}\cdot\gamma_t\cdot d_B, \tag{2.9}$$

R_{BS}, R_{Bp} — расчетные сопротивления болта срезу и расчетное сопротивление смятию;

γ_{B1} — коэффициент условий работы, учитывающий неодновременность включения болтов в работу;

γ_{B2} — коэффициент условий работы, учитывающий расстояние вдоль усилия от края элемента до центра ближайшего отверстия и между центрами отверстий;

n_S — количество плоскостей среза;

$A=\pi d_B^2/4$ — расчетная площадь сечения стержня болта;

d_B — номинальный наружный диаметр стержня болта;

γ_t — см. формулу (2.4).

Определим значение поперечной силы Q, которое может быть воспринято соединением при действии на него момента M.

Из алгоритма построения зависимости «момент — угол поворота» можем получить значение N_M.

Из формулы (2.7)

$$N_Q=\sqrt{N_B^2-N_M^2}. \tag{2.10}$$

Исходя из предположения, что поперечная сила Q равномерно распределяется между болтами соединения, имеем

$$Q=n\cdot N_Q, \tag{2.11}$$

где n — количество болтов соединения.

Указанная процедура повторяется для каждого значения изгибающего момента от 0 до M_{max}.

2.3. Проверка прочности стенки балки и накладки

Для узлов крепления балок к колоннам (рис. 2.7, схема А), в которых предполагаем, что опорные конструкции являются жесткими (их поворот исключен), необходимо произвести следующие проверки:

1) сварные швы:

а) по металлу шва

$((Q/(2\beta_f \cdot k_f \cdot l_w))^2+(6M/(2\beta_f \cdot k_f \cdot l_w^2))^2)^{0,5} \le R_{wf} \cdot \gamma_{wf} \cdot \gamma_c$;

б) по металлу границы сплавления

$((Q/(2\beta_z \cdot k_f \cdot l_w))^2+(6M/(2\beta_z \cdot k_f \cdot l_w^2))^2)^{0,5} \le R_{wz} \cdot \gamma_{wz} \cdot \gamma_c$,

где $M=M_b+Q\cdot(20+a_1)$ для однорядных соединений;

$M=M_b+Q\cdot(20+a_1+a_2/2)$ для двухрядных соединений;

k_f — катет шва;

β_f, β_z — коэффициенты для расчета сварных швов (принимать согласно п. 11.2 СНиП II-23-81*);

l_w — расчетная длина сварного шва ($l_w=h_н-10$ мм);

R_{wf}, R_{wz} — расчетные сопротивления сварных соединений (принимать согласно п. 3.4, табл. 3 СНиП II-23-81*);

γ_{wf}, γ_{wz} — коэффициенты условий работы сварного шва (принимать согласно п. 11.2 СНиП II-23-81*);

γ_c — коэффициент условий работы конструкции (принимать согласно п. 4, табл. 6 СНиП II-23-81*).

2) проверку накладки производим по максимальным напряжениям от

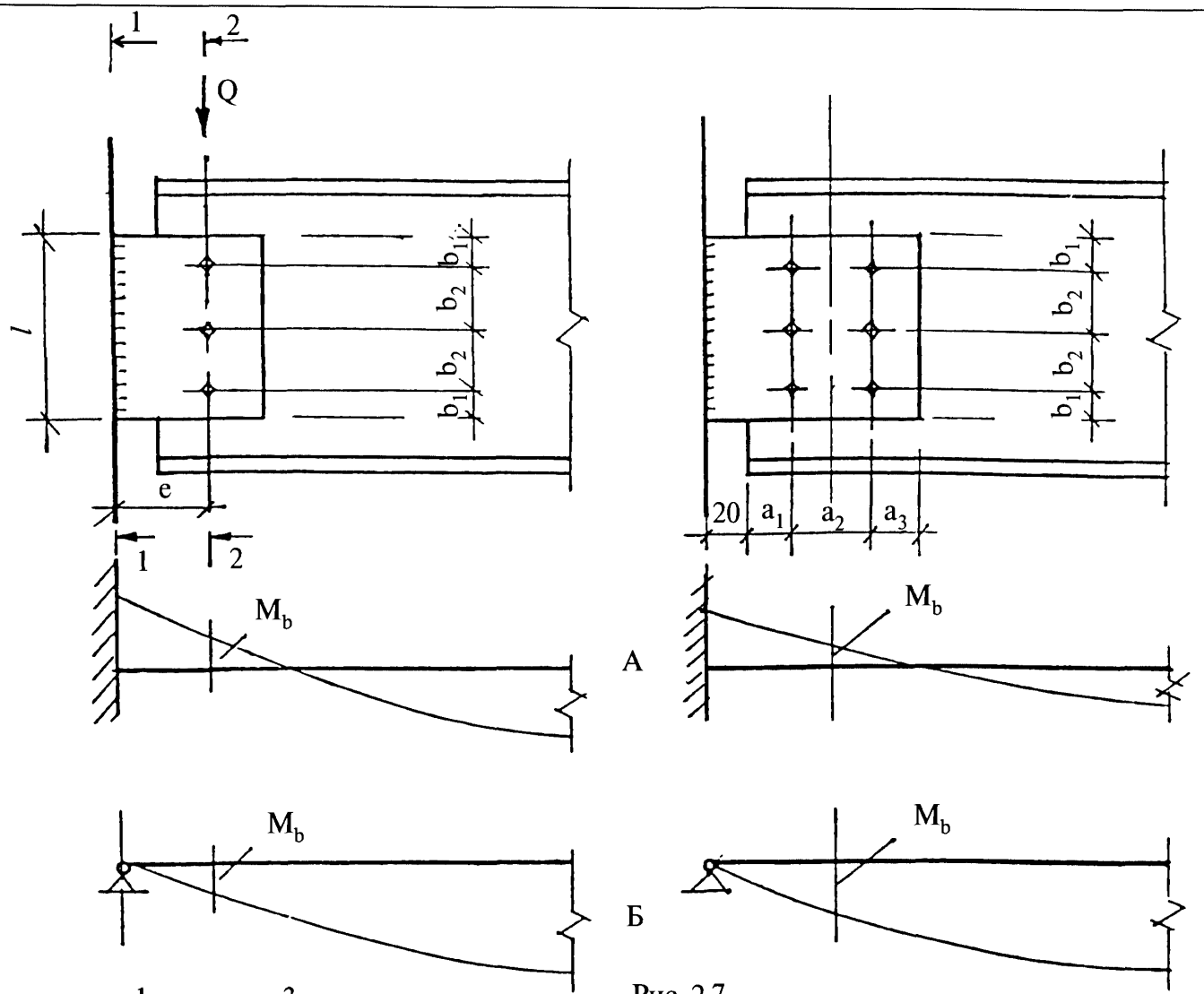

1
2
Q
l
e
b1
b2
b2
b1
20
a1
a2
a3
Mb
А
Б

Рис. 2.7

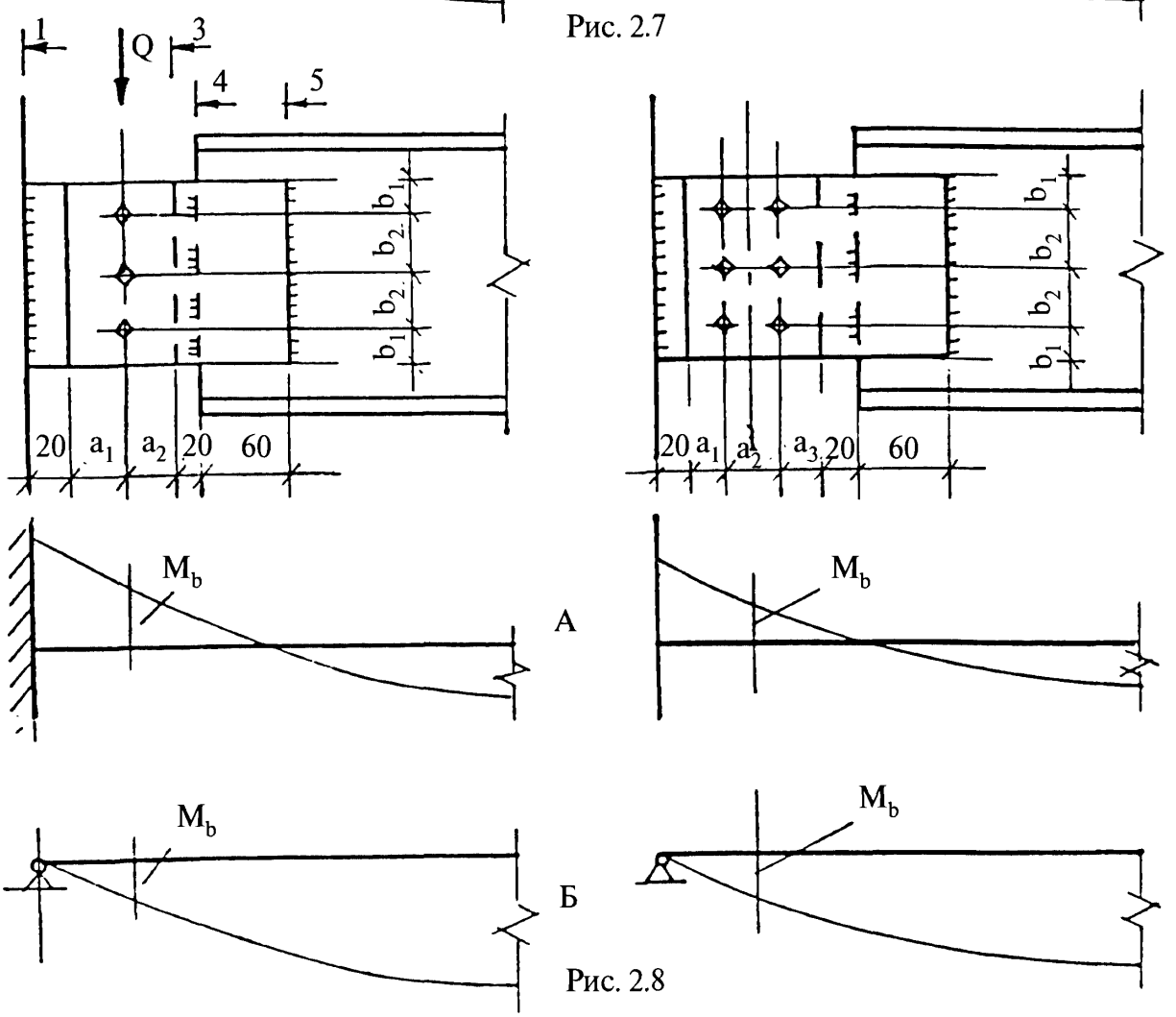

1
Q
3
4
5
b1
b2
b2
b1
20
a1
a2
20
60
a3
Mb
А
Б

Рис. 2.8

совместного действия изгибающего момента и поперечной силы в сечении:

$((M/W_н)^2+(Q/(t_н \cdot h_н))^2)^{0,5} \le R_{ун} \cdot \gamma_c$,

где $M=M_b+Q \cdot (20+a_1)$ для однорядных соединений;

$M=M_b+Q \cdot (20+a_1+a_2/2)$ для двухрядных соединений;

$W_н=t_н \cdot h_н^2/6$ — момент сопротивления накладки;

$t_н$ — толщина накладки;

$h_н$ — высота накладки.

3) проверку стенки балки производим по нормальным и касательным напряжениям:

а) $M_b/W_{ст} \le R_y \cdot \gamma_c$,

где $W_{ст} = s \cdot h^2/6$;

б) $(Q \cdot S_x/I \cdot s) \cdot \alpha_{осл} \le R_s \cdot \gamma_c$,

где $\alpha_{осл} = b/(b—d)$ для однорядных соединений;

b — шаг отверстия;

d — диаметр отверстия;

$\alpha_{осл} = 1$ для двухрядных соединений;

s — толщина стенки балки;

I — момент инерции балки;

S_x — статический момент балки;

R_y, R_s — расчетные сопротивления стали балки.

Для узлов крепления балок к колоннам (рис. 2.7, схема Б), в которых предполагаем, что в опорных конструкциях развивается шарнир (по сечению 1-1), необходимо произвести следующие проверки:

1) сварные швы:

а) по металлу шва

$Q/(2\beta_f \cdot k_f \cdot l_w) \le R_{wf} \cdot \gamma_{wf} \cdot \gamma_c$;

б) по металлу границы сплавления

$Q/(2\beta_z \cdot k_f \cdot l_w) \le R_{wz} \cdot \gamma_{wz} \cdot \gamma_c$.

2) проверку накладки производим по максимальным напряжениям от совместного действия изгибающего момента и поперечной силы в сечении 2-2:

$((M/W_н^*)^2+(Q/(t_н \cdot h_{н0}))^2)^{0,5} \le R_{ун} \cdot \gamma_c$,

где $M=Q \cdot (20+a_1)$ для однорядных соединений;

$W_н^*=t_н \cdot h_0^2/6$;

$h_0=h^*+60$ мм;

h^* — расстояние между крайними болтами;

$h_{н0}=h_н-n \cdot d$;

n — количество отверстий в ряду;

d — диаметр отверстия;

$t_н$ — толщина накладки;

$h_н$ — высота накладки.

3) проверку стенки балки производим по нормальным и касательным напряжениям:

а) $M_b/W_{ст} \le R_y \cdot \gamma_c$,

где $M=Q \cdot (20+a_1)$ для однорядных соединений;

$M=Q \cdot (20+a_1+a_2/2)$ для двухрядных соединений;

б) $(Q \cdot S_x/l \cdot s) \cdot \alpha_{осл} \le R_s \cdot \gamma_c$.

Для узлов крепления вспомогательных балок к главным балкам (рис. 2.8, схема А), в которых предполагаем, что опорные конструкции являются жесткими (их поворот исключен), необходимо произвести следующие проверки:

1) сварные швы в сечении 4-4:

а) по металлу шва

$((Q/(2\beta_f \cdot k_f \cdot l_w))^2+(6M/(2\beta_f \cdot k_f \cdot l_w^2))^2)^{0,5} \le R_{wf} \cdot \gamma_{wf} \cdot \gamma_c$;

б) по металлу границы сплавления

$((Q/(2\beta_z \cdot k_f \cdot l_w))^2+(6M/(2\beta_z \cdot k_f \cdot l_w^2))^2)^{0,5} \le R_{wz} \cdot \gamma_{wz} \cdot \gamma_c$,

где $M=M_b—Q\cdot(50+a_2)$ для однорядных соединений;

$M=M_b—Q\cdot(50+a_3+a_2/2)$ для двухрядных соединений;

2) проверку накладки производим по максимальным напряжениям от совместного действия изгибающего момента и поперечной силы в сечении 2-2:

$((M/W_н^*)^2+(Q/(t_н \cdot h_{н0}))^2)^{0,5} \le R_{ун} \cdot \gamma_c$,

где $M=M_b$ для однорядных соединений;

$M=M_b—Q\cdot a_2/2$ для двухрядных соединений;

3) проверку стенки балки производим по нормальным и касательным напряжениям:

а) $M_b/W_{ст} \le R_y \cdot \gamma_c$,

где $M=M_b—Q\cdot(50+a_2)$ для однорядных соединений;

$M=M_b—Q\cdot(50+a_3+a_2/2)$ для двухрядных соединений;

б) $(Q\cdot S_x/l\cdot s)\cdot\alpha_{осл} \le R_s \cdot \gamma_c$.

Для узлов крепления вспомогательных балок к главным балкам (рис. 2.8, схема Б), в которых предполагаем, что в опорных конструкциях развивается шарнир (по сечению 1-1), необходимо произвести следующие проверки:

1) сварные швы в сечении 4-4:

а) по металлу шва

$((Q/(2\beta_f \cdot k_f \cdot l_w))^2+(6M/(2\beta_f \cdot k_f \cdot l_w^2))^2)^{0,5} \le R_{wf} \cdot \gamma_{wf} \cdot \gamma_c$;

б) по металлу границы сплавления

$((Q/(2\beta_z \cdot k_f \cdot l_w))^2+(6M/(2\beta_z \cdot k_f \cdot l_w^2))^2)^{0,5} \le R_{wz} \cdot \gamma_{wz} \cdot \gamma_c$,

где $M=Q\cdot(70+a_1+a_2)$ для однорядных соединений;

$M=Q\cdot(70+a_1+a_2+a_3)$ для двухрядных соединений;

2) проверку накладки производим по максимальным напряжениям от совместного действия изгибающего момента и поперечной силы в

сечении 4-4:

$((M/W_н^*)^2+(Q/(t_н \cdot h_н))^2)^{0,5} \le R_{ун} \cdot \gamma_c$,

где $M=Q \cdot (40+a_1+a_2)$ для однорядных соединений;

$M=Q \cdot (40+a_1+a_2+a_3)$ для двухрядных соединений;

а) $M_b/W_{ст} \le R_y \cdot \gamma_c$,

где $M=Q \cdot (70+a_1+a_2)$ для однорядных соединений;

$M=Q \cdot (70+a_1+a_2+a_3)$ для двухрядных соединений;

б) $(Q \cdot S_x/l \cdot s) \cdot \alpha_{осл} \le R_s \cdot \gamma_c$.

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

4. Рекомендации по проектированию работающих на сдвиг болтовых соединений стальных строительных конструкций. ВНИПИПромстальконструкция, ЦНИИПроектстальконструкция им. Мельникова. — М., 1990.

5. Каленов В.В., Павлов А.Б. Анализ изгибной жесткости соединений балок с колоннами. Изготовление металлических и монтаж строительных конструкций. Обзорная информация. Выпуск 2. — М.: ЦБНТИ Минмонтажспецстроя СССР.

gost.e-ecolog.ru