

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

Архитектурно-строительный институт
Кафедра «Городское строительство и хозяйство»

08.04.01 «Строительство»
направленность (профиль) «Техническая эксплуатация и реконструкция
зданий и сооружений»

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

на тему Деформационный метод расчета железобетонных элементов с
использованием диаграмм материалов нормативных документов

Студент(ка)

Е.М. Малинова

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Научный

В.А. Ерышев

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

руководитель

Консультанты

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель программы д.т.н., профессор В.А. Ерышев

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

(личная подпись)

« ____ » _____ 20 ____ г.

Допустить к защите

Заведующий кафедрой

к.т.н., доцент Д.С. Тошин

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

(личная подпись)

« ____ » _____ 20 ____ г.

Тольятти 2016

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
Глава 1 Экспериментальные исследования бетонной призмы.....	6
1.1 Методика испытаний опытных образцов	6
1.2 Результаты экспериментальных исследований.....	7
1.3 Выводы к первой главе	11
Глава 2 Расчетные зависимости описания диаграмм деформирования арматуры в отечественных и зарубежных нормах	12
2.1 Обзор аналитических зависимостей по описанию диаграмм.....	13
2.2 Описание диаграмм деформирования арматуры в соответствии с СП63.13330-2012	19
2.2.1 Описание двухлинейных диаграмм деформирования арматуры	19
2.2.2 Описание трехлинейных диаграмм деформирования арматуры	20
2.2.3 Построение двухлинейных и трехлинейных диаграмм деформирования арматуры	21
2.3 Описание нелинейных диаграмм деформирования арматуры	27
2.3.1 Описание нелинейных диаграмм деформирования арматуры через деформации	29
2.3.2 Описание нелинейных диаграмм деформирования арматуры через напряжения	32
2.3.3 Построение нелинейных диаграмм деформирования арматуры	33
2.4 Описание диаграмм деформирования арматуры в соответствии с СНБ 5.03.01-02.....	39
2.4.1 Арматура для конструкций без предварительного напряжения	39
2.4.2 Арматура для предварительно напряженных конструкций	40
2.4.3 Построение диаграмм деформирования арматуры в соответствии с СНБ 5.03.01-02.....	42
2.5 Выводы ко второй главе	46

Глава 3 Расчетные зависимости описания диаграмм деформирования бетона в отечественных нормах	47
3.1 Описание двухлинейных диаграмм деформирования бетона по СП 63.13330.2012	50
3.2 Описание трехлинейных диаграмм деформирования бетона по СП 63.13330.2012	51
3.3 Выводы к третьей главе	54
Глава 4 Расчет сечения железобетонного элемента по прочности	55
4.1 Уравнение равновесия внутренних усилий в нормальном сечении железобетонного элемента	55
4.2 Расчет прочности железобетонного элемента по трехлинейной диаграмме	56
Выводы по 4 главе	73
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	74
СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ	75
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ	76
ПРИЛОЖЕНИЯ	80

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. На протяжении всей жизни человек постоянно эволюционировал и создавал все больше и больше предметов, чтобы облегчить себе жизнь. Сначала орудием труда в жизни людей были обтесанные камни и палки, но поняв какие это хрупкие и ненадежные материалы человек начал изготавливать все возможные инструменты из металла. В VI – V веке до н.э. люди научились применять металл для изготовления орудий труда и создания всех возможных предметов. От монет до кувшинов, от мечей и топоров до украшения. Металл начали применять повсюду и в 1867 году садовник Жозеф Монье придумал сочетание материалов для создания прочных горшков, в основе которой лежали стальная проволока, обмазанная цементно-песчаным раствором. Так было зарегистрировано первое применение железобетона.

В XXI веке железобетон применяют для создания строительных конструкций которые воспринимают значительные нагрузки. Арматура в железобетоне применяется как часть монолитной схемы (арматура-бетон) для восприятия изгибающего усилия, в результате которой арматура начинает деформироваться под действием нагрузки и в случае критической нагрузки не давать конструкции полностью разрушиться. У арматуры как у бетона есть предельный уровень нагружения, который называется «предел текучести арматуры». Данная характеристика очень важна при расчете железобетонных конструкций и приводится в СП63.13330-2012. Но бывают ситуации, когда нужно наглядно в кратчайшие сроки понять соответствует ли арматура в железобетонных элементах предъявляемым к ней требованиям для дальнейшей эксплуатации. Для этого с каждым годом все больше совершенствуются методы расчеты железобетонных конструкций. Именно поэтому данная магистерская диссертация на тему «Деформационный метод расчета железобетонных элементов с использованием диаграмм материалов нормативных документов» считается актуальной.

Цель: разработка алгоритма расчета диаграмм деформирования арматуры для расчета железобетонного элемента.

Задачи диссертационной работы:

- провести анализ наиболее точных вариантов построения диаграмм деформирования арматуры в отечественных и зарубежных нормах, представляющих собой зависимость « $\sigma_b - \varepsilon_b$ ».

- Разработать аналитическую зависимость построения криволинейных диаграмм деформирования арматуры.

- На основании построенных диаграмм рассчитать сечение железобетонного элемента.

Методы исследования: в процессе работы были применены теоритические и экспериментальные методы исследования.

Научная новизна диссертации: В данной работе представлен расчет железобетонного элемента с применением алгоритмов расчета диаграмм деформирования бетона и арматуры.

Практическая значимость: Алгоритм может служить основой для расчета железобетонных конструкций.

Объем и структура диссертации: Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, библиографического списка из 34 наименований и приложений. Работа изложена на 79 страницах машинописного текста, содержит 28 рисунков, 7 таблиц и 2 приложения.

Глава 1 Экспериментальные исследования бетонной призмы

1.1 Методика испытаний опытных образцов

Для проведения экспериментального исследования использованы три бетонные призмы заводского изготовления одинакового размера с сечением 150× 150 мм и высотой 600 мм. Бетонные образцы были изготовлены в 2009 году в металлических опалубках одновременно из одного состава тяжелого бетона в условиях Тольяттинского завода железобетонных изделий в летний период времени. Образцы хранились в лаборатории при комнатной температуре в естественных условиях.

Перед испытанием опытных образцов размечена база измерений продольных деформаций 300 мм.

Испытания данных образцов проводились на прессе с предельным усилием 250т, который предназначен для статических испытаний на сжатие образцов бетонов.

Перед началом испытаний каждого из образцов была приготовлена гипсовая смесь, которая наносилась на бетонные образцы для выравнивания поверхностей. В связи с тем, что поверхность образцов должны параллельны плитам пресса и друг другу при сжатии

После выравнивания поверхностей образец устанавливается между подвижной и неподвижной плитами пресса, и производится его центровка.

После подготовительных работ на каждой грани бетонного образца устанавливаются индикаторы часового типа (танзометрические датчики) с ценой деления 0,01мм, закрепленные через удлинители в рамках. Рамки расположены на расстоянии 300 мм друг от друга. С помощью индикаторов измеряются осевые деформации.

Нагрузка при испытании увеличивается пропорционально – ступенями. Одна ступень составляет 0,1 единицу от разрушающей нагрузки, выдержка на каждой ступени составляет 5 минут, после чего снимались показания

приборов. Разрушение опытного образца произошло хрупко с хлопком по продольной оси образца (рис. 1). Все образцы показаны в приложении А.



Рисунок 1 - Испытание опытного образца

1.2 Результаты экспериментальных исследований

Из протоколов испытаний в таблицах 1, 2, 3 представлены значения нагрузок P и показания индикаторов осевых перемещений. По значениям нагрузки и площади сечения призмы определяем значения напряжений:

$$\sigma = \frac{P}{A_b} \text{ МПа}, \quad (1)$$

где P – нагрузка, т;

A_b – площадь поперечного сечения призмы, мм^2 .

Также из показаний приборов вычисляются относительные осевые деформации ε_b , по формуле:

$$\varepsilon_b = \Delta l / l, \quad (2)$$

где $l=300$ мм база измерений осевых деформаций.

Результаты расчетов представлены в таблицах 1, 2, 3.

Таблица 1 - Результаты испытаний 1 образца

№ ступени нагрузки	P, т	σ , кг/см ²	Δl_1	Δl_2	Δl_3	Δl_4	Δl	$\varepsilon \times 10^{-5}$
1	0	0	0	0	0	0	0	0
2	5	22	0,02	0,02	0,01	0,01	0,015	5
3	10	44	0,04	0,05	0,03	0,03	0,0375	12,5
4	20	89	0,1	0,1	0,07	0,06	0,0825	27,5
5	30	133	0,15	0,15	0,11	0,1	0,1275	42,5
6	40	178	0,2	0,21	0,15	0,13	0,1925	57,5
7	50	222	0,25	0,26	0,2	0,18	0,2225	74,17
8	60	267	0,3	0,31	0,24	0,22	0,2675	89,17
9	70	311	0,39	0,42	0,34	0,31	0,365	121,7
10	75	333	0,41	0,44	0,36	0,33	0,385	128,3
11	80	356	0,44	0,46	0,38	0,35	0,4075	135,8
12	85	378	0,46	0,48	0,4	0,37	0,4275	142,5
13	90	400	0,48	0,51	0,42	0,39	0,45	150,0
14	95	422	0,5	0,53	0,44	0,41	0,47	156,7
15	100	444	0,53	0,56	0,7	0,44	0,5	166,7
16	105	467	0,57	0,6	0,51	0,47	0,5735	179,2
17	110	489						

Таблица 2 - Результаты испытаний 2 образца

№ ступени нагрузки	P, т	σ , кг/см ²	Δl_1	Δl_2	Δl_4	Δl	$\varepsilon \times 10^{-5}$
1	0	0	0	0	0	0	0
2	20	89	0,09	0,1	0,07	0,087	28,9
3	30	133	0,15	0,14	0,11	0,133	44,4
4	40	178	0,23	0,18	0,15	0,187	62,2
5	50	222	0,31	0,23	0,19	0,243	81,1
6	60	267	0,38	0,28	0,23	0,297	98,9
7	70	311	0,45	0,34	0,28	0,357	118,9
8	80	356	0,53	0,41	0,33	0,423	141,1
9	70	311	0,51	0,38	0,3	0,397	132,2

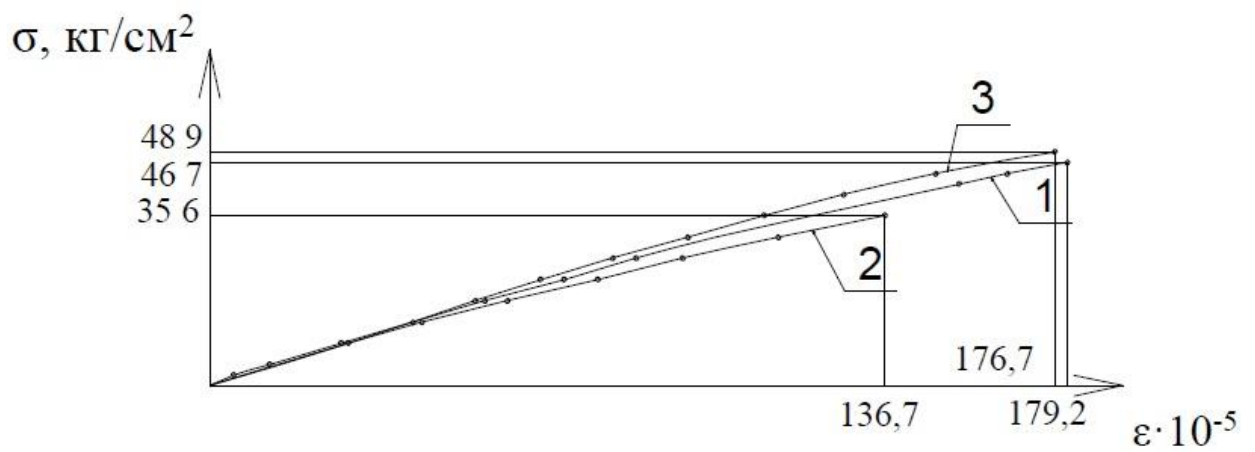
Продолжение таблицы 2

№ ступени нагрузки	P, т	σ , кг/см ²	Δl_1	Δl_2	Δl_4	Δl	$\varepsilon \times 10^{-5}$
10	60	267	0,47	0,34	0,27	0,36	120
11	40	178	0,38	0,25	0,2	0,247	92,2
12	20	89	0,26	0,15	0,1	0,17	56,7
13	0	0	0,03	0,03	0,01	0,023	7,8
14	20	89	0,14	0,14	0,09	0,123	41,1
15	40	178	0,25	0,23	0,17	0,216	72,2
16	60	267	0,35	0,32	0,25	0,307	102,2
17	80	356	0,47	0,43	0,33	0,41	136,7
18	90	400					

Таблица 3 - Результаты испытаний 3 образца

№ ступени нагрузки	P, т	σ , кг/см ²	Δl_1	Δl_2	Δl_3	Δl_4	Δl	$\varepsilon \times 10^{-5}$
1	0	0	0	0	0	0	0	0
2	30	133	0,13	0,14	0,13	0,11	0,1275	42,5
3	40	178	0,18	0,16	0,17	0,15	0,165	55,0
4	50	222	0,23	0,20	0,20	0,2	0,2075	69,2
5	60	267	0,28	0,25	0,24	0,24	0,2525	84,2
6	70	311	0,34	0,3	0,28	0,28	0,3	100
7	60	267	0,31	0,3	0,25	0,25	0,2775	92,5
8	40	178	0,23	0,23	0,22	0,18	0,215	71,7
9	20	133	0,15	0,13	0,09	0,11	0,1	40
10	0	0	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	3,33
11	20	133	0,11	0,12	0,11	0,09	0,1075	35,8
12	40	178	0,19	0,18	0,19	0,16	0,18	60
13	60	267	0,28	0,27	0,27	0,24	0,265	88,3
14	70	311	0,32	0,31	0,31	0,28	0,305	101,7
15	80	356	0,37	0,35	0,35	0,32	0,3475	115,83
16	90	400	0,42	0,4	0,4	0,37	0,3975	132,5
17	100	444	0,48	0,45	0,46	0,43	0,455	151,7
18	110	489						

По табличным данным строятся диаграммы изменения деформационных параметров бетона с ростом нагрузки в координатах « σ_B - ε_B ».



1 - первый образец; 2 - второй образец; 3 - третий образец

Рисунок 2 - Диаграммы бетона на сжатие

Опытные диаграммы деформирования бетона имеют нелинейный характер выпуклостью к оси напряжения.

1.3 Выводы к первой главе

1. Проведено испытание опытных бетонных образцов, которое показало, что образцы, изготовленные из одинакового бетона и находившиеся в одинаковых условиях при изготовлении, выдерживают разную нагрузку.

2. В программном комплексе ArchiCAD реализованы диаграммы бетона на сжатие « σ - ϵ ».

Глава 2 Расчетные зависимости описания диаграмм деформирования арматуры в отечественных и зарубежных нормах

В зависимости от механических свойств арматурная сталь подразделяется на классы. Классы арматуры имеют разную структуру, разные характеристики. Очень важным аспектом определения характеристик является определение группы предельного состояния, которые напрямую влияют на безопасность эксплуатации здания или сооружения. Предельным состоянием считается состояние, при котором конструкции перестает удовлетворять требованиям, заложенным изначально. К таким требованиям относятся нагрузки и воздействия, недопустимое перемещение или местное повреждение. К первой группе предельных состояний относятся состояния, удовлетворяющие требованиям железобетонных конструкций по несущей способности, а именно наибольшая нагрузка, при которой строительная конструкция может работать без потери своих функциональных качеств. Ко второй группе предельных состояний относятся состояния, удовлетворяющие требованиям железобетонных конструкций по пригодности к нормальной эксплуатации, а именно эксплуатации строительной конструкции в соответствии с предусмотренными нормами, а также с предусмотренным техническим обслуживанием без капитального ремонта и реконструкции.

Для построения диаграмм деформирования арматуры были взяты основные характеристики первой и второй групп предельных состояний из СП 63.13330.2012.

Различают 2 вида диаграмм деформирования арматуры – прямолинейные и криволинейные диаграммы. В основе построения данных диаграмм лежит зависимость « $\sigma_b - \varepsilon_b$ » где σ_b - напряжение в арматуре, а ε_b – деформации арматуры.

Прямолинейные диаграммы деформирования арматуры представляют собой диаграммы, описывающие работу арматуры с помощью прямых линий. Прямолинейные диаграммы деформирования арматуры бывают 2ух и 3ех линейные и приводятся в СП 63.13330.2012 «Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения»

Криволинейные диаграммы деформирования арматуры представляют собой кривую, состоящую из массива точек, описывающих работу арматуры.

2.1 Обзор аналитических зависимостей по описанию диаграмм

Различают два вида диаграмм растяжения арматурных сталей: "условную" и "истинную". В первом случае напряжения определяют исходя из начальной площади поперечного сечения, а во втором – исходя из реальной (уменьшающейся в процессе нагружения) площади поперечного сечения. В расчетах железобетонных конструкций, как правило, используют условные диаграммы, которые и рассматриваются ниже. На диаграмме арматуры различают начальный линейный участок до напряжений $\sigma_{s,el}$ и последующий нелинейный.

Большинство диаграмм на нелинейном участке можно представить в виде

$$\varepsilon_s = \frac{\sigma_s}{E_s \nu_s}, \quad (3)$$

где ε_s - общие деформации, которые складываются из упругих $\varepsilon_{s,el}$ и пластических $\varepsilon_{s,p}$,

$$\varepsilon_s = \varepsilon_{s,el} + \varepsilon_{sp}, \quad (4)$$

E_s - модуль упругости, σ_s - напряжения, ν_s - коэффициент изменения секущего модуля ($\nu_s E_s$ - секущий модуль).

Учитывая, что

$$\varepsilon_{s,el} = \sigma_s / E_s, \quad (5)$$

и принимая во внимание (4), из формулы (3) следует

$$\nu_s = \frac{\varepsilon_{s,el}}{\varepsilon_{s,el} + \varepsilon_{s,p}}, \quad (6)$$

отсюда коэффициент ν_s еще называют коэффициентом упругости, поскольку он характеризует отношение упругих деформаций к общим деформациям.

Четкую границу значений $\varepsilon_{s,el}$ установить трудно, поэтому эти деформации зачастую отождествляют с напряжениями $\sigma_{s0,01}$ или $\sigma_{s0,02}$, которым соответствуют остаточные (пластические) деформации, равные соответственно 0,01% и 0,02% ($\varepsilon_{sp} = 0,0001 - 0,0002$). До этих значений пластические деформации можно не учитывать. Важную роль в вычислениях имеет точка на диаграмме с напряжениями $\sigma_{s0,2}$. Этим напряжениям отвечают пластические деформации $\varepsilon_{sp} = \varepsilon_{s0,2} = 0,2\%$ ($\varepsilon_{sp} = 0,002$). Значения этих напряжений с обеспеченностью 2σ принимают в качестве нормативных (R_{sn}) при расчете конструкций по предельным состояниям (σ - среднеквадратичные отклонения значений σ_s приведены в ГОСТах на арматуру). Последней характерной точкой является точка в вершине диаграммы. Напряжения в вершине диаграммы ниже обозначаются σ_{su} или $\hat{\sigma}_s$, а деформации $\hat{\varepsilon}_{su}$ или $\hat{\varepsilon}_s$.

Согласно (6) основной величиной, необходимой для определения ν_s , является величина пластической деформации ε_{sp} . Имеется много предложений по определению ε_{sp} . Укажем на наиболее известные предложения:

- А.Е. Надаи (на участке $\sigma_{s0,01} \leq \sigma_s \leq \sigma_{s0,2}$)

$$\varepsilon_{sp} = \varepsilon_{s0,2} \left(\frac{\sigma_s - \sigma_{s0,01}}{\sigma_{s0,2} - \sigma_{s0,01}} \right), \quad (7)$$

- ЕКБ (по предложению Ф. Бергеса)

$$\varepsilon_{sp} = 0,002 \left(\frac{\sigma_s - 0,716\sigma_{s0,2}}{0,284\sigma_{s0,2}} \right), \quad (8)$$

- Н.М. Мулина, Ю.П. Гущи, Б.П. Горячева, О.М. Рыбакова

$$\varepsilon_{sp} = \frac{3,5 + a\Delta\sigma_s}{17,5 - b\Delta\sigma_s}, \quad (9)$$

где $\Delta\sigma_s = ((\sigma_s / \sigma_{s0,2}) - 1) \cdot 100\%$, a, b – эмпирические коэффициенты;

- ряда исследователей (Ромберга, Остгута, А.И.Семенова и др.)

$$\varepsilon_{sp} = k\sigma_s^n, \text{ или } \varepsilon_{sp} = a(\sigma_s / \hat{\sigma}_s)^m, \quad (10)$$

где k, n, a, m – эмпирические параметры;

- С.А. Мадатяна [41]

$$\varepsilon_{sp} = m \left(\frac{\sigma_s}{\sigma_{s0,2}} - \eta \right)^n, \quad (11)$$

здесь

$$\eta = \sigma_{s,el} / \sigma_{s0,2}; \quad m = 0,002 / (1 - \eta)^n; \quad n \approx 3.$$

Имеется ряд предложений по непосредственному определению V_s .

Н.М. Мулин и Ю.П. Гуща рекомендовали вычислять V_s при $\sigma_{s0,2} \leq \sigma_s \leq \hat{\sigma}_s$ по формуле

$$\nu_s = \widehat{\nu}_s + (\nu_{s0,2} - \widehat{\nu}_s) [A\chi^n + (1-A)\chi], \quad (12)$$

где $\widehat{\nu}_s$ и $\nu_{s0,2}$ - значения ν_s , соответствующие вершине диаграммы и напряжениям $\sigma_{s0,2}$;

$$\nu_{s0,2} = \frac{\sigma_{s0,2}}{4000 + \sigma_{s0,2}}; \quad \widehat{\nu}_s = \frac{\widehat{\sigma}_s}{60000 + \widehat{\sigma}_s}, \quad (13)$$

(здесь $\sigma_{s0,2}$ и $\widehat{\sigma}_s$ принимают в кгс/см²), χ - относительный уровень напряжений

$$\chi = \frac{\widehat{\sigma}_s - \sigma_s}{\widehat{\sigma}_s - \sigma_{s0,2}}, \quad (14)$$

где n – показатель степени, зависящий от вида стали.

В целом ряде работ (С.М. Крылова и Ю.В. Зайцева, О.А. Коковина, Н.И. Карпенко) используется диаграмма в виде ломаной линии, состоящая из двух или трех участков.

Предложение по аналитическому описанию диаграммы деформирования в виде ломаной линии состоящей из многих участков представлено в работе В.М. Бондаренко, С.В. Бондаренко.

Параметр ν_s диаграммы, состоящей из трех прямых отрезков можно записать в виде:

$$\nu_{si} = \frac{(\sigma_{s2} - \sigma_{s1})\sigma_{si}}{(\sigma_{si} - \sigma_{s1}) \left(\frac{\sigma_{s2}}{\nu_{s2}} - \sigma_{s1} \right) + \sigma_{s1}(\sigma_{s2} - \sigma_{s1})}, \quad (15)$$

где:

$i = 1$ (первый участок, $\sigma_{si} \leq 0,9\sigma_{s0,2}$), при этом $\sigma_{s1} = \sigma_{si}$, $\nu_{si} = 1$;

$i = 2$ (второй участок, $0,9\sigma_{s0,2} < \sigma_{si} \leq \sigma_{s0,2}$), при этом

$$\sigma_{s1} = 0,9\sigma_{s0,2}, \sigma_{s2} = \sigma_{s0,2}, \nu_{s2} = \nu_{s0,2};$$

$i = 3$ (третий участок, $\sigma_{s0,2} < \sigma_{si} \leq \hat{\sigma}_s$), при этом $\sigma_{s1} = \sigma_{s0,2}, \sigma_{s2} = \hat{\sigma}_s$,

$$\nu_{s2} = \hat{\nu}_s.$$

($\nu_{s0,2}$ и $\hat{\nu}_s$ - вычисляются по формуле (13).

В работе В.И.Митасова и Д.А.Федорова разработана более общая чем (15) трехзвенная диаграмма, состоящая из трех криволинейных отрезков (сплайн функций). В местах стыковки совпадают значения функций и их первых производных.

Наиболее применимыми к построению инкрементальной модели представляются зависимости, разработанные в работе Н.И.Карпенко, Т.А.Мухамедиева, А.Н.Петрова, которые, после доработки, и будем использовать в дальнейших построениях. Нелинейные отрезки диаграмм арматуры записываются по аналогии зависимостями для бетона и имеют вид:

$$\nu_s = \hat{\nu}_s + (\nu_0 - \hat{\nu}_s) \sqrt{1 - \omega_1 \eta - \omega_2 \eta^2}, \quad (16)$$

$$\nu_s^k = \left[\frac{1}{\nu_s} + \frac{\sigma_s (\nu_0 - \hat{\nu}_s) (\omega_1 + 2\omega_2 \eta)}{2\nu_s^2 (\hat{\sigma}_s - \sigma_{s,el}) \sqrt{1 - \omega_1 \eta - \omega_2 \eta^2}} \right]^{-1}, \quad (17)$$

где ν_s^k - коэффициент изменения касательного модуля ($\nu_s^k E_s$ - касательный модуль), который фигурирует при определении приращений деформаций $d\varepsilon_s$ по приращениям напряжений $d\sigma_s$,

$$d\varepsilon_s = \frac{d\sigma_s}{E_s \nu_s^k}, \quad (18)$$

$\nu_0 = 1, \hat{\sigma}_s = \sigma_{su}, \hat{\varepsilon}_s = \varepsilon_{su}$; η - уровень нелинейных напряжений (при $\sigma_s \leq \sigma_{s,el}, \eta = 0$), при $\sigma_s > \sigma_{s,el}$

$$\eta = \frac{\sigma_s - \sigma_{s,el}}{\hat{\sigma}_s - \sigma_{s,el}}, \quad (19)$$

ω_1 - параметр подбираемый из условия, чтобы диаграмма проходила через точку $(\sigma_{s0,2}, \varepsilon_{s0,2})$,

$$\omega_1 = \frac{(\nu_0 - \hat{\nu}_s)^2 (\eta_{0,2}^2 - 1) + (\nu_{s0,2} - \hat{\nu}_s)^2}{\eta_{0,2} (\eta_{0,2} - 1) (\nu_0 - \hat{\nu}_s)^2}, \quad (20)$$

здесь

$$\eta_{0,2} = \frac{\sigma_{s0,2} - \sigma_{s,el}}{\hat{\sigma}_s - \sigma_{s,el}}; \quad \nu_{0,2} = \frac{\sigma_{s0,2}}{\sigma_{s0,2} + 0,002E_s}. \quad (21)$$

Недостаток зависимостей (16)-(21) заключается в том, что значения V_s и V_s^k являются функциями напряжений, в то время как при использовании МКЭ в форме перемещений возникает необходимость находить значения V_s и V_s^k по значениям (или уровням) деформаций. Этот недостаток зависимости (16) можно устранить, вводя уровень деформаций

$$\eta_d = \varepsilon_s / \hat{\varepsilon}_s, \quad (22)$$

однако при этом получаются довольно громоздкие и неудобные для использования зависимости. Представим построение более простых зависимостей для диаграмм арматуры в функции от уровней напряжений и деформаций.

2.2 Описание диаграмм деформирования арматуры в соответствии с СП63.13330-2012

В современных нормативных документах СП 63.13330-2012 рекомендуется производить расчет по диаграммам состояния (двухлинейная и трехлинейная).

2.2.1 Описание двухлинейных диаграмм деформирования арматуры

Зависимость σ_s – напряжения от ε_s – деформаций для двухлинейной диаграммы арматуры (рис. 3) определяется по формулам:

При $0 < \varepsilon_s < \varepsilon_{s0}$

$$\sigma_s = \varepsilon_s \cdot E_s \quad (23)$$

При $\varepsilon_{s0} < \varepsilon_s < \varepsilon_{s2}$

$$\sigma_s = R_s \quad (24)$$

где: ε_{s0} для арматуры с физической площадкой текучести $\varepsilon_{s0} = \frac{R_s}{E_s}$

ε_{s0} для арматуры без физической площадки текучести $\varepsilon_{s0} = \frac{R_s}{E_s} + 0,002$

$E_s = 2,0 \cdot 10^5$ МПа – модуль упругости арматуры;

R_s – расчетные значения сопротивления арматуры;

$\varepsilon_{s2} = 0,025$ – относительные деформации

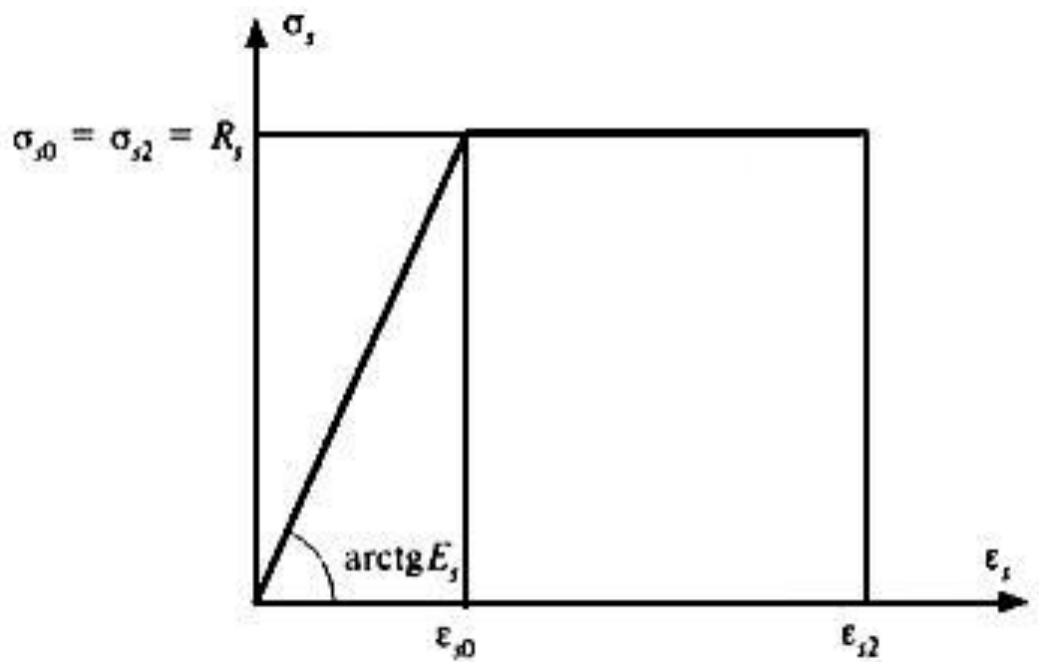


Рисунок 3 - Двухлинейная диаграмма состояния растянутой арматуры

2.2.2 Описание трехлинейных диаграмм деформирования арматуры

Зависимость σ_s – напряжения от ε_s – деформаций для трехлинейной диаграммы арматуры (рис. 4) определяется по формулам:

При $0 < \varepsilon_s < \varepsilon_{s1}$

$$\sigma_s = \varepsilon_s \cdot E_s, \quad (25)$$

При $\varepsilon_{s1} < \varepsilon_s < \varepsilon_{s2}$

$$\sigma_s = \left(1 - \frac{\sigma_{s1}}{R_s} \cdot \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{s1}}{\varepsilon_{s0} - \varepsilon_{s1}}\right) + \frac{\sigma_{s1}}{R_s} \cdot R_s \leq 1,1 R_s, \quad (26)$$

где: ε_{s0} для арматуры с физической площадкой текучести $\varepsilon_{s0} = \frac{R_s}{E_s}$

ε_{s0} для арматуры без физической площадки текучести $\varepsilon_{s0} = \frac{R_s}{E_s} + 0,002$

$E_s = 2,0 \cdot 10^5$ МПа – модуль упругости арматуры;

R_s – расчетные значения сопротивления арматуры;

$\varepsilon_{s2} = 0,015$ – относительные деформации

Значения принимают:

$$\sigma_{s1}=0,9R_s \quad (27)$$

$$\sigma_{s2}=1,1R_s \quad (28)$$

$$\varepsilon_{s1} = \frac{0,9R_s}{E_s} \quad (29)$$

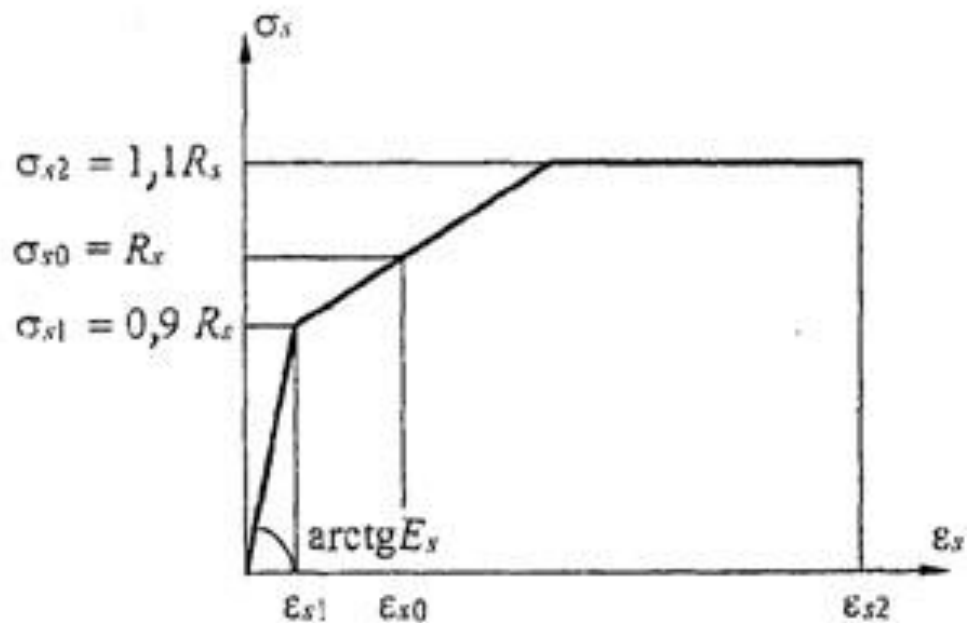
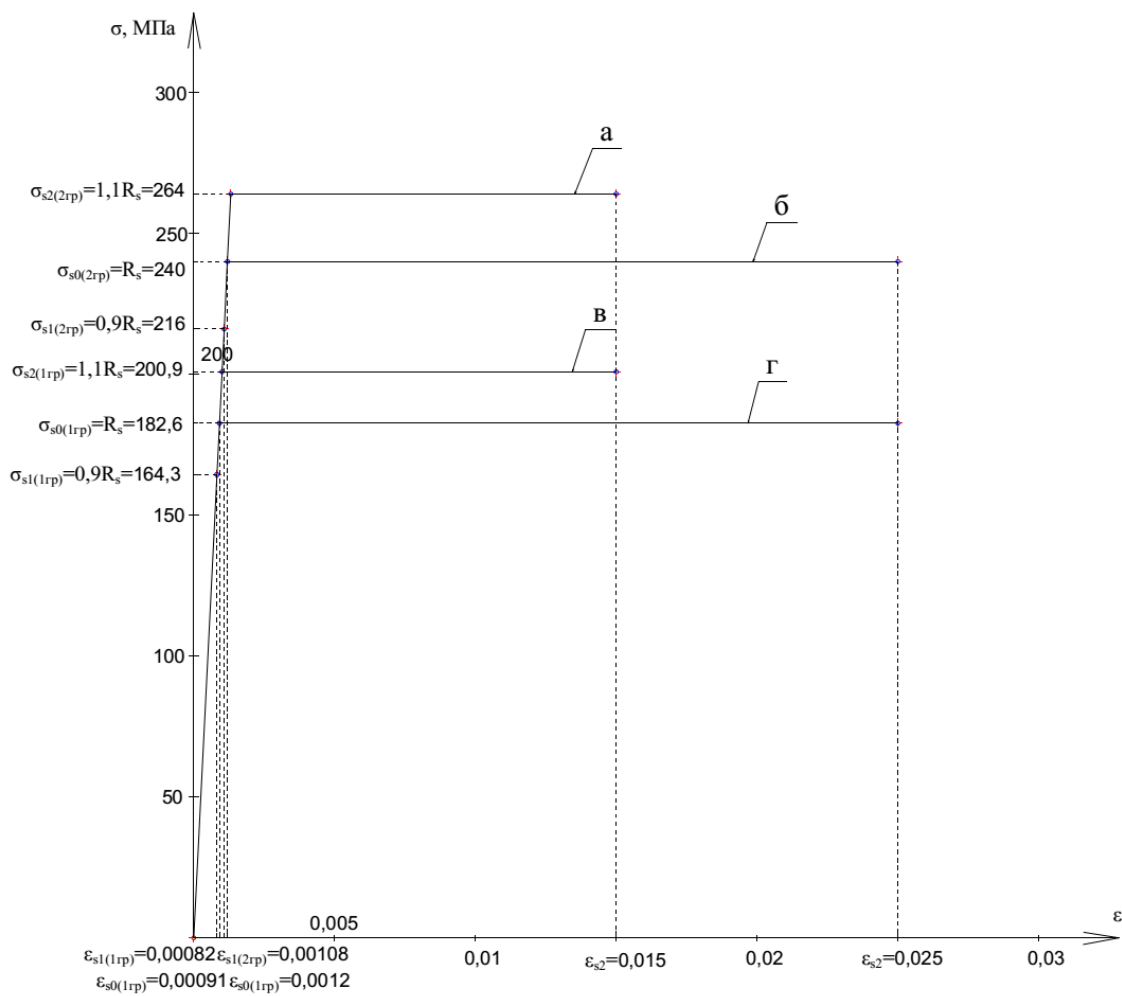


Рисунок 4 - Трехлинейная диаграмма состояния растянутой арматуры

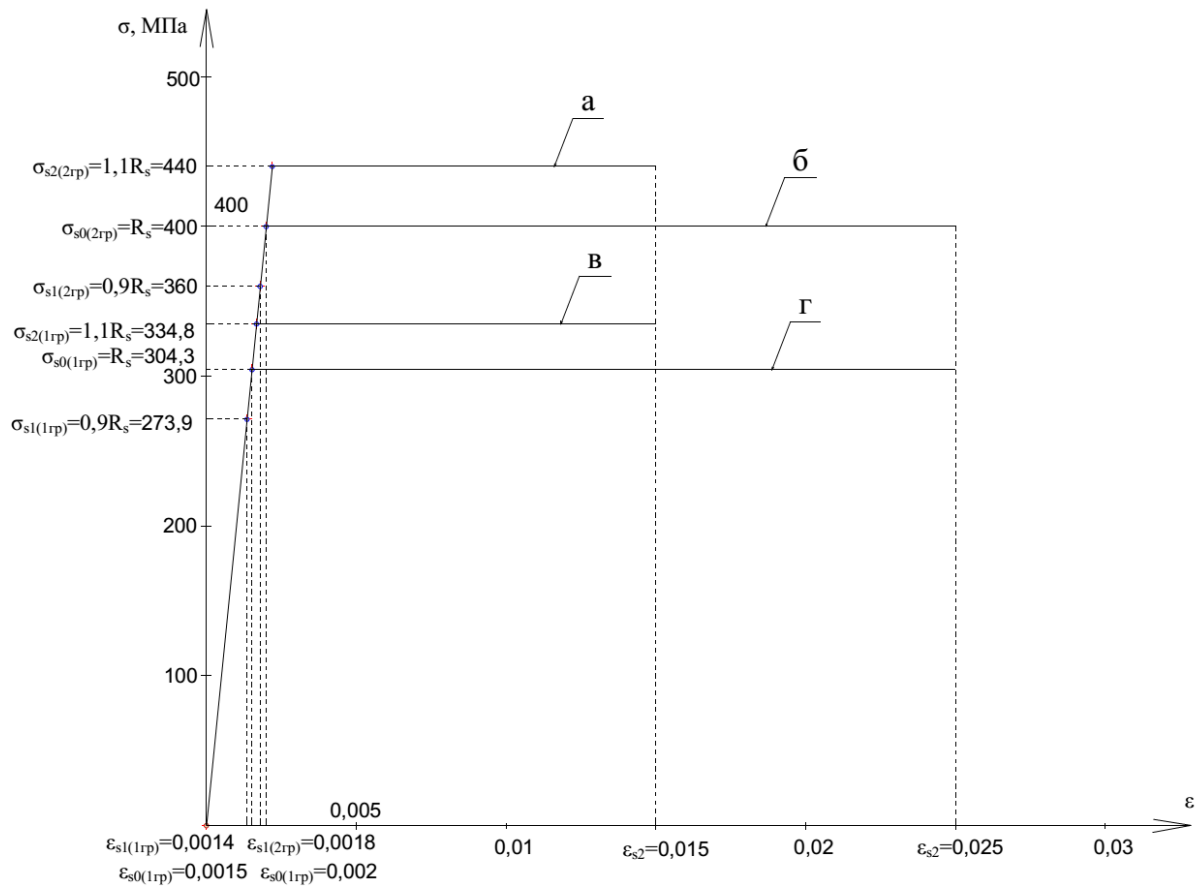
2.2.3 Построение двухлинейных и трехлинейных диаграмм деформирования арматуры

После данных расчетов (приложение Б), описанных выше, строим кривые для арматуры классов А240, А400, А600, А800, А1000 (рис. 5-9) в соответствии с нормативными значениями сопротивления по первой и второй группам предельных состояний.



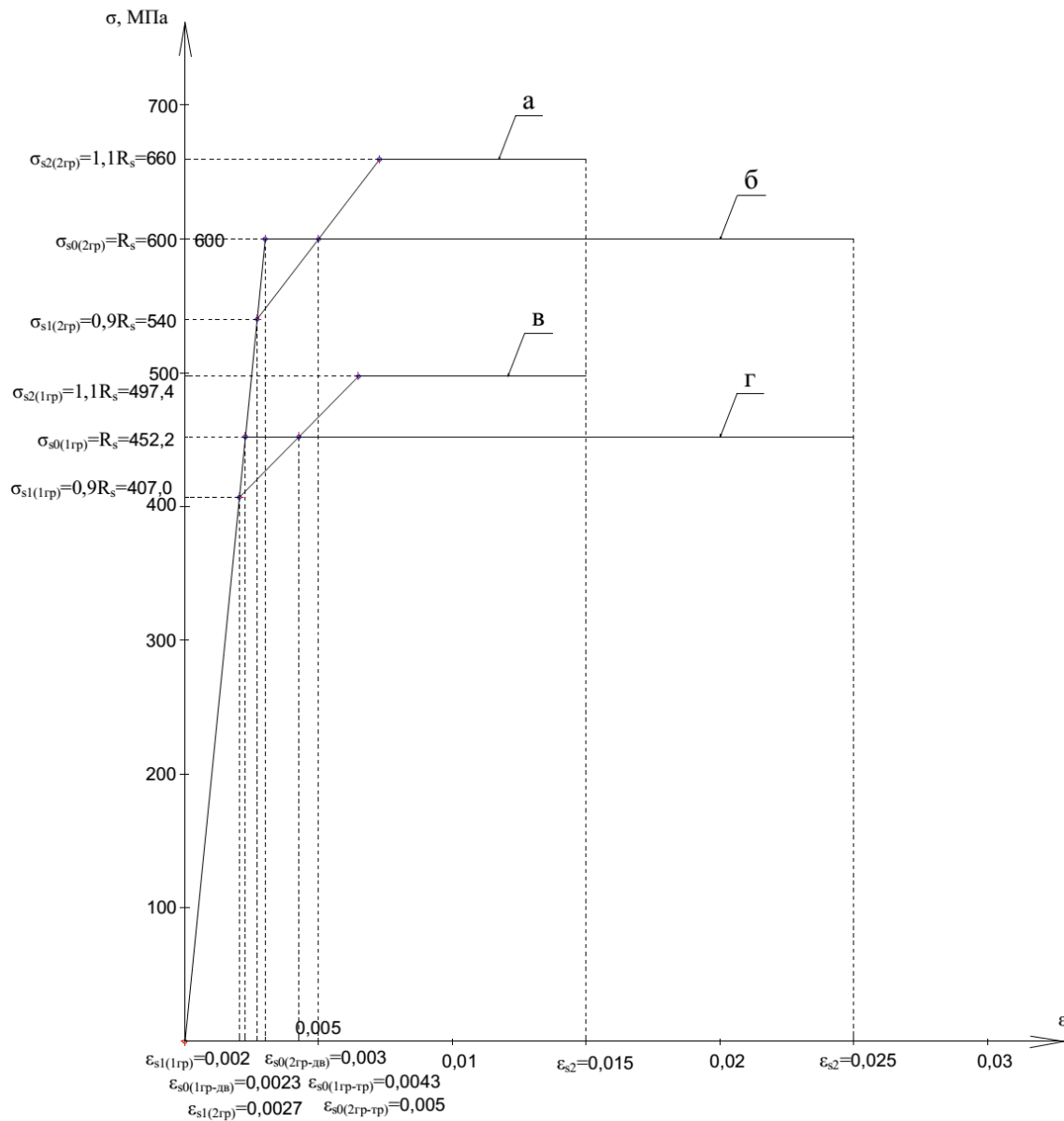
- а) трехлинейная диаграмма расчет по второй группе предельных состояний;
- б) двухлинейная диаграмма расчет по второй группе предельных состояний;
- в) трехлинейная диаграмма расчет по первой группе предельных состояний;
- г) двухлинейная диаграмма расчет по первой группе предельных состояний

Рисунок 5 – Диаграммы состояния растянутой арматуры класса А240



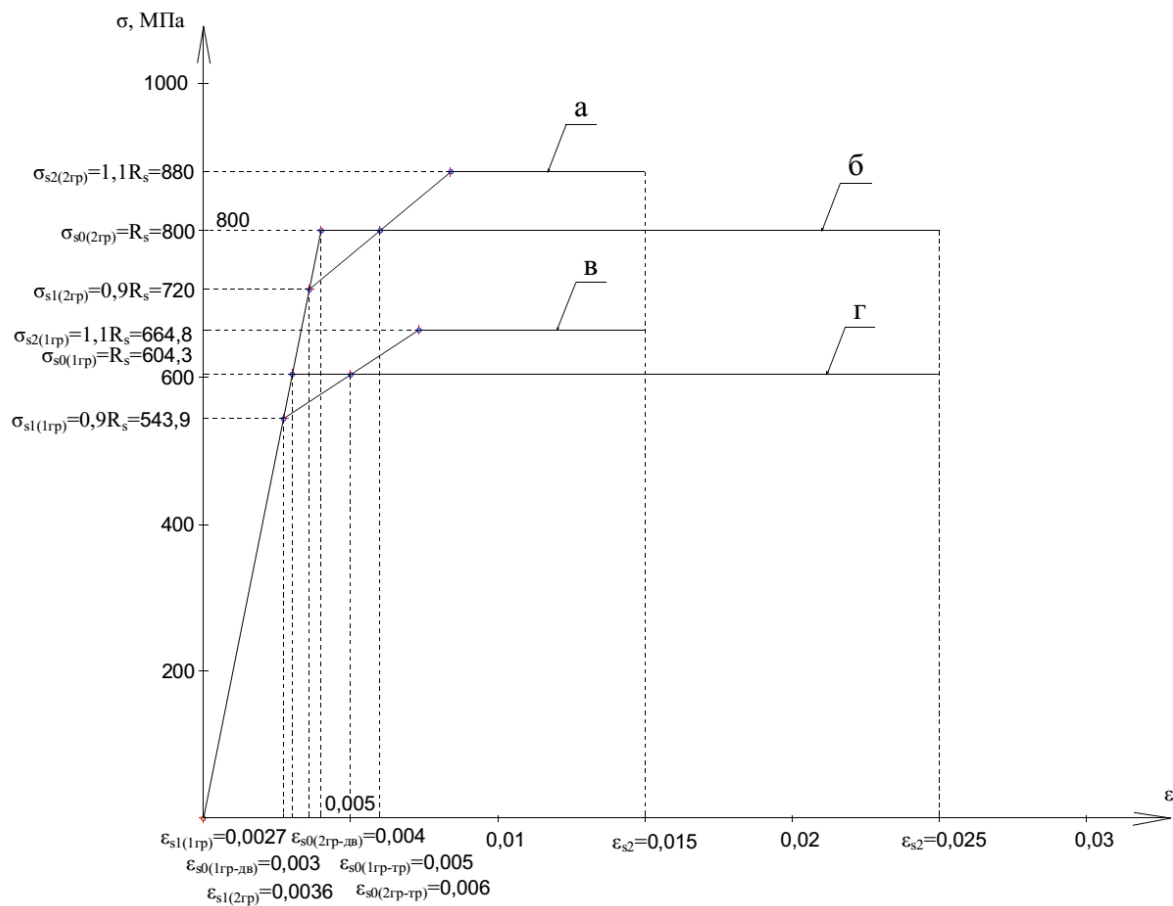
- а) трехлинейная диаграмма расчет по второй группе предельных состояний;
- б) двухлинейная диаграмма расчет по второй группе предельных состояний;
- в) трехлинейная диаграмма расчет по первой группе предельных состояний;
- г) двухлинейная диаграмма расчет по первой группе предельных состояний;

Рисунок 6 – Диаграммы состояния растянутой арматуры класса А400



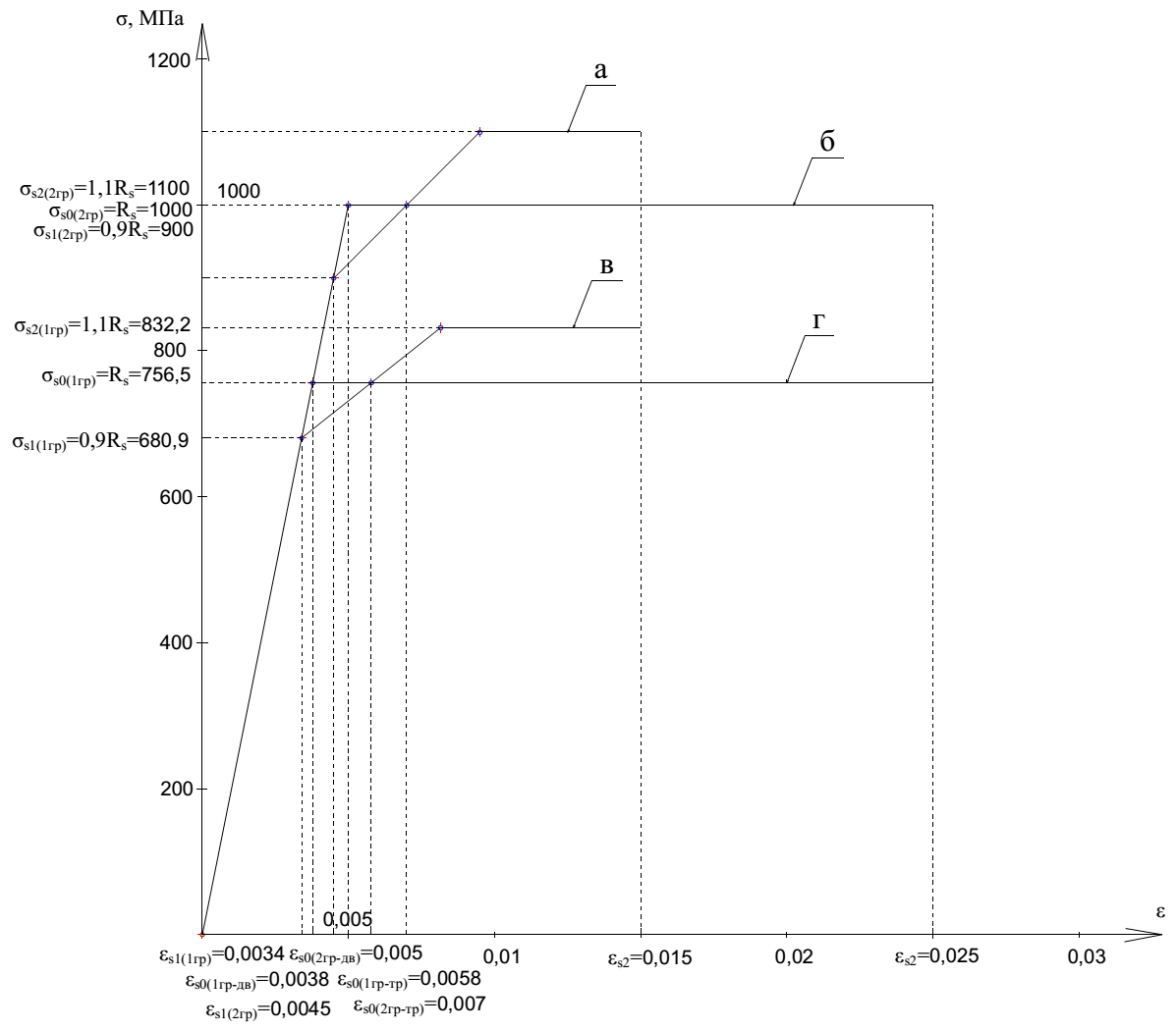
- а) трехлинейная диаграмма расчет по второй группе предельных состояний;
- б) двухлинейная диаграмма расчет по второй группе предельных состояний;
- в) трехлинейная диаграмма расчет по первой группе предельных состояний;
- г) двухлинейная диаграмма расчет по первой группе предельных состояний;

Рисунок 7 – Диаграммы состояния растянутой арматуры класса А600



- а) трехлинейная диаграмма расчет по второй группе предельных состояний;
- б) двухлинейная диаграмма расчет по второй группе предельных состояний;
- в) трехлинейная диаграмма расчет по первой группе предельных состояний;
- г) двухлинейная диаграмма расчет по первой группе предельных состояний;

Рисунок 8 – Диаграммы состояния растянутой арматуры класса А800



- а) трехлинейная диаграмма расчет по второй группе предельных состояний;
- б) двухлинейная диаграмма расчет по второй группе предельных состояний;
- в) трехлинейная диаграмма расчет по первой группе предельных состояний;
- г) двухлинейная диаграмма расчет по первой группе предельных состояний;

Рисунок 9 – Диаграммы состояния растянутой арматуры класса А1000

2.3 Описание нелинейных диаграмм деформирования арматуры

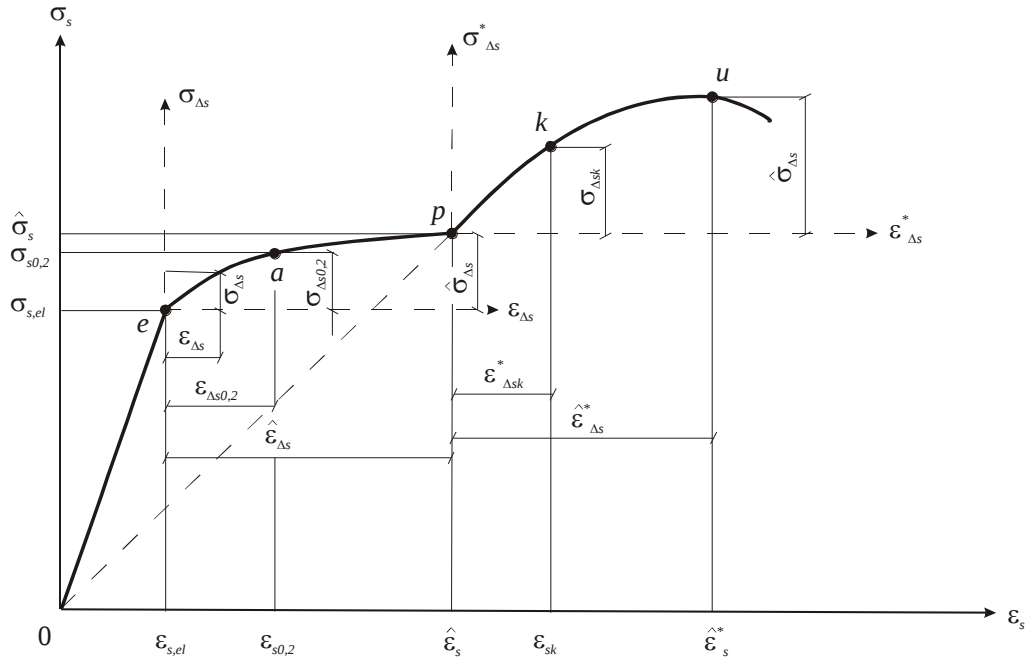
Выделяем два вида диаграмм арматуры: 1) с площадкой текучести, 2) без площадки текучести.

Схематически диаграмма деформирования арматуры с площадкой текучести представлена на рис. 10а. Она состоит из трех отрезков: *oe* – линейный отрезок (до напряжений $\sigma_{s,el}$ и деформаций $\varepsilon_{s,el}$); *ear* – слабо нелинейный отрезок текучести ($\bar{\sigma}_s, \bar{\varepsilon}_s$ – напряжения и относительные деформации в конце площадки текучести, в точке «*p*»); *rki* – отрезок упрочнения ($\bar{\sigma}_s^*, \bar{\varepsilon}_s^*$ – напряжения и относительные деформации в точке «*u*» – в конце площадки упрочнения).

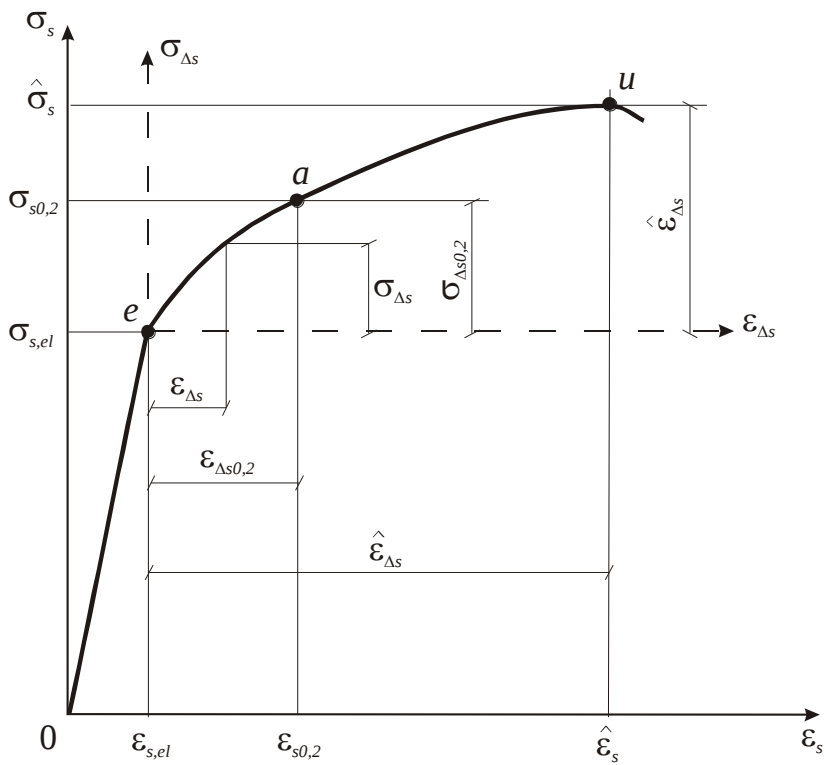
На отрезке текучести *ear* выделяется точка «а» (предела текучести), которой соответствуют остаточные реформации при полной разгрузке (вдоль линейного отрезка), равные $2 \cdot 10^{-3}$ (0,2%). Ниже эти деформации обозначаются $\varepsilon_{\Delta 0,2} = 2 \cdot 10^{-3}$, полные относительные деформации и напряжения в точке «а» обозначены $\varepsilon_{0,2}$ и $\sigma_{0,2}$; фактически они являются граничными величинами (величинами предела текучести), которые нормативными документами допускаются в расчетах. Остальная часть диаграммы представляет интерес при расчете конструкций на особые воздействия, а также при моделировании реального характера разрушения.

На отрезке текучести *ear* выделяется точка «а» (предела текучести), которой соответствуют остаточные реформации при полной разгрузке (вдоль линейного отрезка), равные $2 \cdot 10^{-3}$ (0,2%). Ниже эти деформации обозначаются $\varepsilon_{\Delta 0,2} = 2 \cdot 10^{-3}$, полные относительные деформации и напряжения в точке «а» обозначены $\varepsilon_{0,2}$ и $\sigma_{0,2}$; фактически они являются граничными величинами (величинами предела текучести), которые нормативными документами допускаются в расчетах. Остальная часть диаграммы представляет интерес при расчете конструкций на особые воздействия, а также при моделировании реального характера разрушения.

а)



б)



а) – с площадкой текучести, б) – без площадки текучести

Рисунок 10 - Диаграммы деформирования арматуры

2.3.1 Описание нелинейных диаграмм деформирования арматуры через деформации

Расчет железобетонных конструкций с использованием диаграмм деформирования бетона и арматуры в последние годы стал наиболее актуальным. Аналитические зависимости связи напряжений σ_s и деформаций ε_s в диаграммах деформирования арматуры конструируются на основании опытных данных, полученных при испытаниях стержней арматуры на растяжение. В исследованиях многих авторов диаграмма арматуры разделяется на два участка: линейный от $\sigma_s = 0$ до $\sigma_s = \sigma_{s,el}$ и нелинейный от $\sigma_s = \sigma_{s,el}$ до $\sigma_s = \sigma_{s,u}$,

где $\sigma_{s,el}$ - предел упругости арматуры, равный $R_{s,n}\eta_{s,el}$;

$\sigma_{s,u}$ – сопротивление арматура разрыву, равное $R_{s,n}\gamma_{su}$;

$\varepsilon_{s,u}$ - относительная деформация, соответствующая $\sigma_{s,u}$.

Диаграмма должна пройти через три базовые точки с координатами: $\sigma_{s,el}, \varepsilon_{s,el}$; $\sigma_{s0,2}, \varepsilon_{s0,2}$; $\sigma_{s,u}, \varepsilon_{s,u}$.

В расчетах по нелинейной деформационной модели диаграмму деформирования горячекатаной арматуры нормативными документами разрешается использовать до нарушения условия

$$\varepsilon_s \leq 0,025, \quad (30)$$

При нарушении условия (30) стержень выключается из работы.

Построение более простых зависимостей для диаграмм арматуры.

Нелинейный участок (при $\sigma_s > \sigma_{s,el}$) представляется через приращения напряжений $\sigma_{\Delta s}$ и приращения деформаций $\varepsilon_{\Delta s}$,

$$\sigma_{\Delta s} = \sigma_s - \sigma_{s,el}; \quad \varepsilon_{\Delta s} = \varepsilon_s - \varepsilon_{s,el}, \quad (31)$$

Значения приращений напряжений и деформаций в точке предела текучести «а» и в конце нелинейного участка – в точке «р» соответственно будут равны:

$$\sigma_{\Delta s0,2} = \sigma_{s0,2} - \sigma_{s,el}, \quad \varepsilon_{\Delta s0,2} = \varepsilon_{s0,2} - \varepsilon_{s,el}, \quad (32)$$

$$\sigma_{\Delta s} = \sigma_s - \sigma_{s,el}, \quad \varepsilon_{\Delta s} = \varepsilon_s - \varepsilon_{s,el}$$

Уровни напряжений и деформаций на нелинейном отрезке составят:

$$\eta_{\Delta s} = \frac{\sigma_{\Delta s}}{\sigma_{\Delta s}}, \quad \eta_{\Delta d} = \frac{\varepsilon_{\Delta s}}{\varepsilon_{\Delta s}}, \quad (33)$$

соответственно при $\varepsilon_{\Delta s} = \varepsilon_{\Delta s0,2}$,

$$\eta_{\Delta s0,2} = \frac{\sigma_{\Delta s0,2}}{\sigma_{\Delta s}}, \quad \eta_{\Delta d0,2} = \frac{\varepsilon_{\Delta s0,2}}{\varepsilon_{\Delta s}} \quad (34)$$

На нелинейном отрезке диаграммы

$$\sigma_{\Delta s} = \varepsilon_{\Delta s} E_s \nu_{\Delta s} \quad (35)$$

Соответственно значения коэффициента секущего модуля $\nu_{\Delta s}$, в начале диаграммы ($\nu_{\Delta 0}$), в точке предела текучести ($\nu_{\Delta s} = \nu_{\Delta s0,2}$) и в вершине диаграммы $\nu_{\Delta s} = \nu_{\Delta s}$ определяются по формулам:

$$\nu_{\Delta 0} \approx 1; \quad \nu_{\Delta s0,2} = \frac{\sigma_{\Delta s0,2}}{\varepsilon_{\Delta s0,2} E_s}; \quad \nu_{\Delta s} = \frac{\sigma_{\Delta s}}{\varepsilon_{\Delta s} E_s}. \quad (36)$$

Исследования показали, что для определения $\nu_{\Delta s}$ от уровня деформаций $\eta_{\Delta d}$ можно использовать следующую простую зависимость:

$$\nu_{\Delta s} = \nu_{\Delta s} + \nu_{\Delta s} (1 - \eta_{\Delta d}) + c \nu_{\Delta s} (1 - \eta_{\Delta d})^k \nu_{\Delta 0} - 2 + c \nu_{\Delta s} (1 - \eta_{\Delta d})^n, \quad (37)$$

где c, k, n – константы (для определенного вида арматуры), методика вычисления которых представлена в работе. Нетрудно видеть, что зависимость (18) удовлетворяет граничным условиям. Так,

$$\text{при } \eta_{\Delta d} = 0 \quad \nu_{\Delta s} = \nu_{\Delta 0},$$

$$\text{при } \eta_{\Delta d} = 1 \quad \nu_{\Delta s} = \nu_{\Delta s}.$$

Определим связь между общим коэффициентом изменения секущего модуля – величиной ν_s и ее значением $\nu_{\Delta s}$ на нелинейном отрезке диаграммы. Учитывая, что

$$\varepsilon_s = \frac{\sigma_s}{E_s \nu_s} = \varepsilon_{s,el} + \varepsilon_{\Delta s} = \frac{\sigma_{s,el}}{E_s} + \frac{\sigma_{\Delta s}}{E_s \nu_{\Delta s}}, \quad (38)$$

находим

$$\nu_s = \frac{\varepsilon_{s,el} + \varepsilon_{\Delta s} \nu_{\Delta s}}{\varepsilon_s}, \quad (39)$$

А затем находим:

$$\sigma_s = \varepsilon_s E_s \nu_s \quad (40)$$

При текущих значениях уровней деформаций в пределах $0 \leq \eta_{\Delta d} \leq 1$ и величинах констант: $c = 2, k = 7, n = 20$ по формуле (37) вычисляется коэффициент $\nu_{\Delta s}$, по формуле (39) – значения коэффициента ν_s и по формуле (40) соответствующие величины напряжений.

2.3.2 Описание нелинейных диаграмм деформирования арматуры через напряжения

В общем виде связь между напряжениями и деформациями на нелинейном участке устанавливается

$$\varepsilon_s = \frac{\sigma_s}{\nu_s E_s}, \quad (41)$$

где ε_s – полные относительные деформации.

E_s - модуль упругости стали, ν_s - коэффициент секущего модуля

Коэффициент ν_s численно равен отношению упругих деформаций к полным

$$\nu_s = \frac{\varepsilon_{sy}}{\varepsilon_{sy} + \varepsilon_{sp}}, \quad (42)$$

На линейном участке (при $\sigma_s \leq \sigma_{s,el}$) $\varepsilon_{sp} = 0$, коэффициент $\nu_s = 1$ и формула (41) принимает вид

$$\varepsilon_s = \frac{\sigma_s}{E_s}, \quad (43)$$

ν_s - для арматуры в виде

$$\nu_s = \nu_s + \nu_0 - \nu_s \sqrt{1 - \omega \eta - 1 - \omega \eta^2}, \quad (44)$$

где ν_s - коэффициент изменения секущего модуля в вершине диаграммы (при $\sigma_s = \sigma_{s,u} = \sigma_s$),

$$\nu_s = \frac{\sigma_s}{E_s \varepsilon_s}, \quad (45)$$

η - уровень приращения напряжений,

$$\eta = \frac{\sigma_s - \sigma_{s,el}}{\sigma_s - \sigma_{s,el}}, \quad (46)$$

ω – коэффициент, характеризующий кривизну диаграммы,

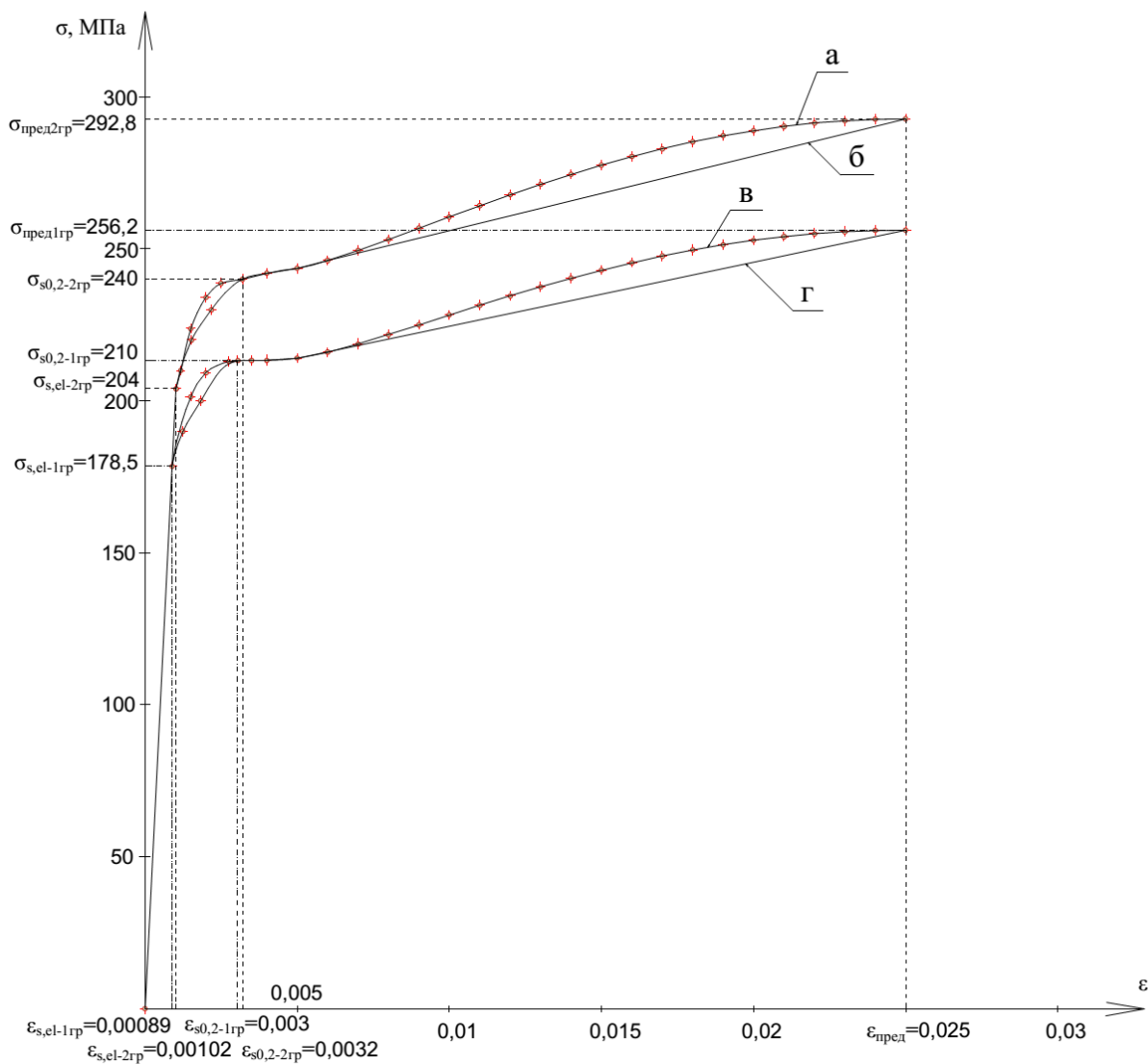
$$\omega = \frac{1 - \nu_s}{\eta_{0,2}} \frac{\eta_{0,2}^2 - 1}{\eta_{0,2} - 1} + \frac{(\nu_{0,2} - \nu_s)^2}{(1 - \nu_s)^2}, \quad (47)$$

$\eta_{0,2}$ - уровень напряжений при $\sigma_s = \sigma_{s0,2}$, $\nu_{0,2}$ – коэффициент изменения секущего модуля при $\sigma_s = \sigma_{s0,2}$

$$\eta_{0,2} = \frac{\sigma_{s0,2} - \sigma_{s,el}}{\sigma_s - \sigma_{s,el}}, \nu_{0,2} = \frac{\sigma_{s0,2}}{\sigma_{s0,2} + 0,002E_s} \quad (48)$$

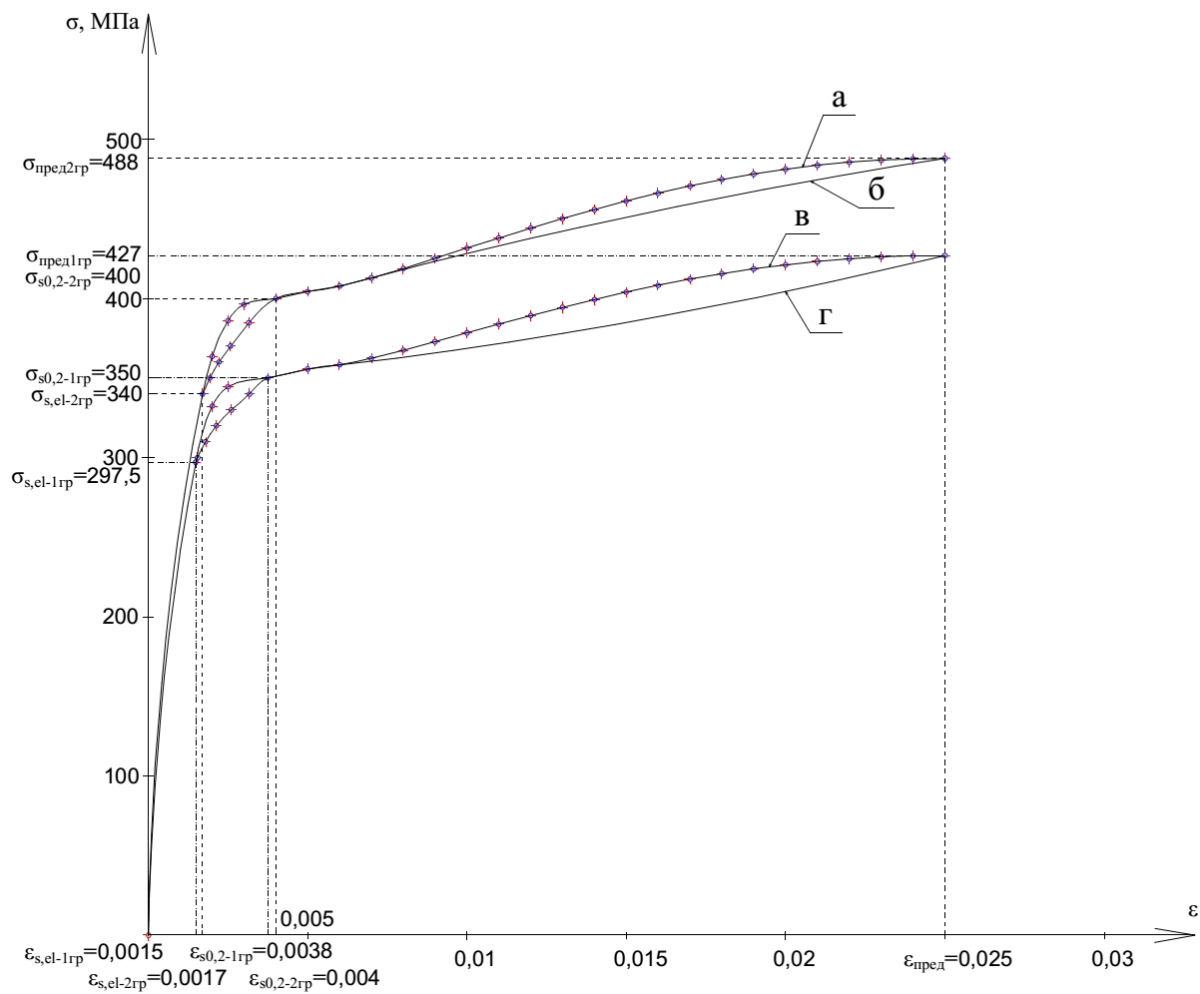
2.3.3 Построение нелинейных диаграмм деформирования арматуры

После расчетов (приложение Б), описанных выше, строим кривые для арматуры классов А240, А400, А600, А800, А1000 (рис. 11-15) в соответствии с нормативными значениями сопротивления по первой и второй группам предельных состояний, которые проходят через базовые точки достаточно удовлетворительно описывают промежуточные их значения на нелинейном участке деформирования в пределах изменения деформаций $\varepsilon_{s,el} \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_s$ ($\varepsilon_s = 0.025$).



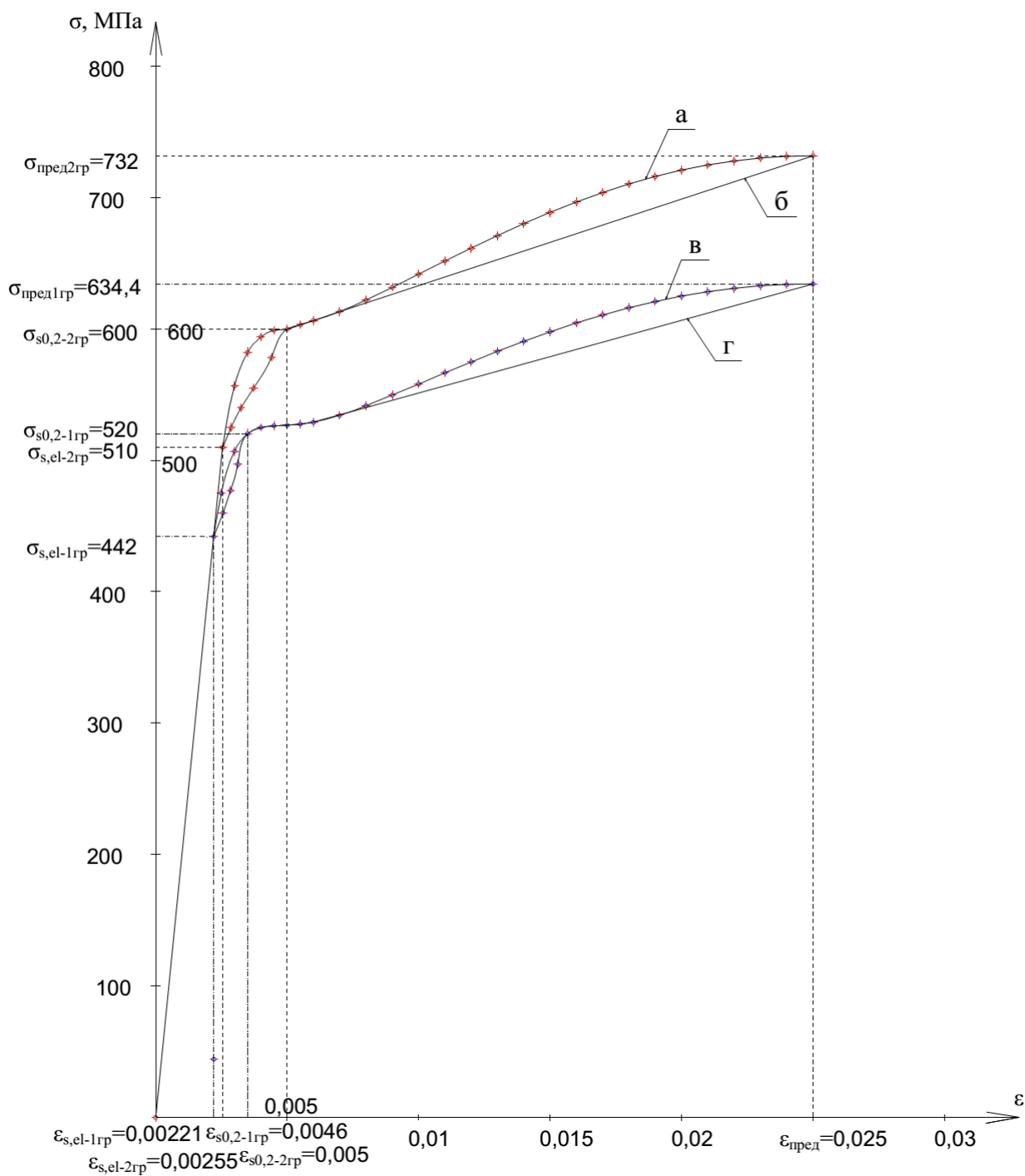
- а) расчет по второй группе предельных состояний через деформации;
- б) расчет по второй группе предельных состояний через напряжения;
- в) расчет по первой группе предельных состояний через деформации;
- г) расчет по первой группе предельных состояний через напряжения

Рисунок 11 – Диаграммы состояния растянутой арматуры класса А240



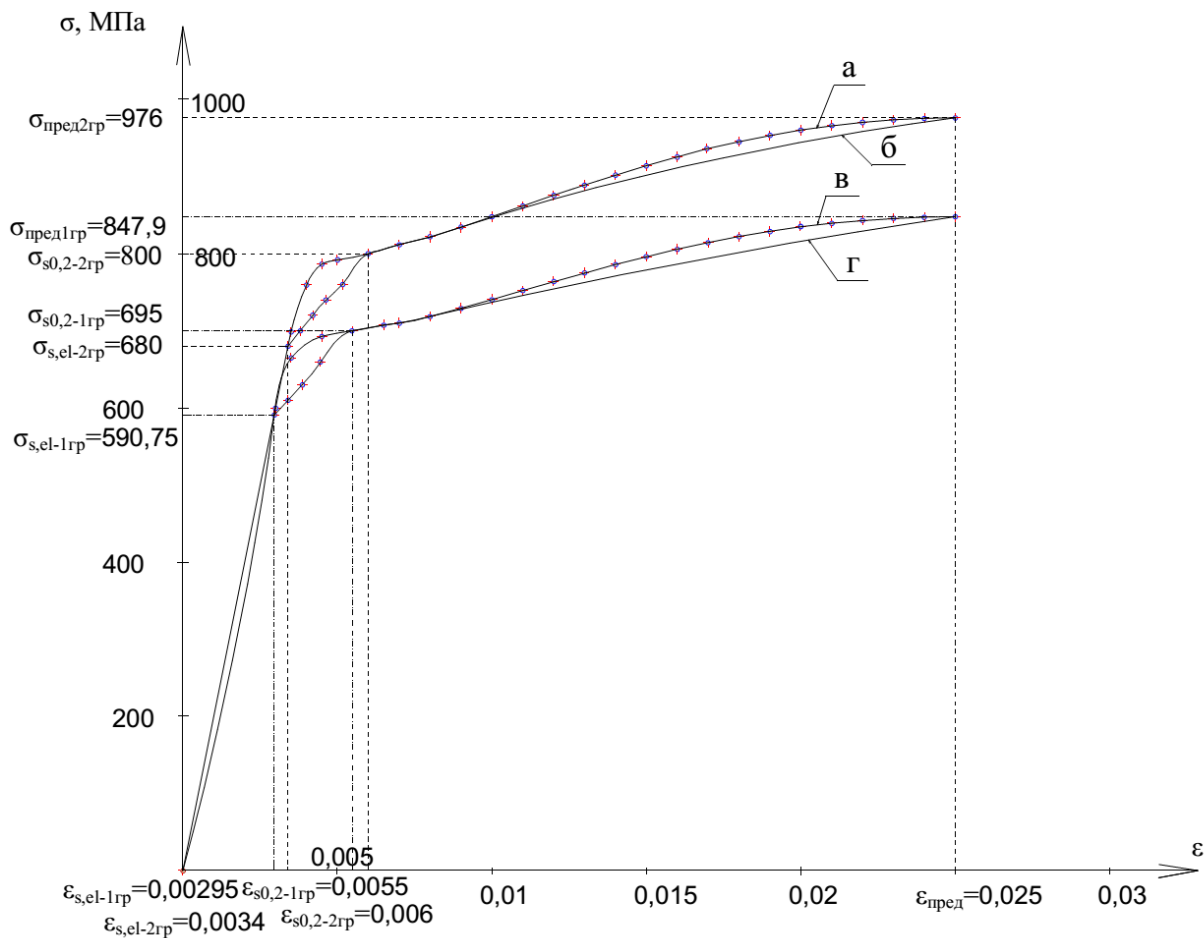
- а) расчет по второй группе предельных состояний через деформации;
- б) расчет по второй группе предельных состояний через напряжения;
- в) расчет по первой группе предельных состояний через деформации;
- г) расчет по первой группе предельных состояний через напряжения

Рисунок 12 – Диаграммы состояния растянутой арматуры класса А400



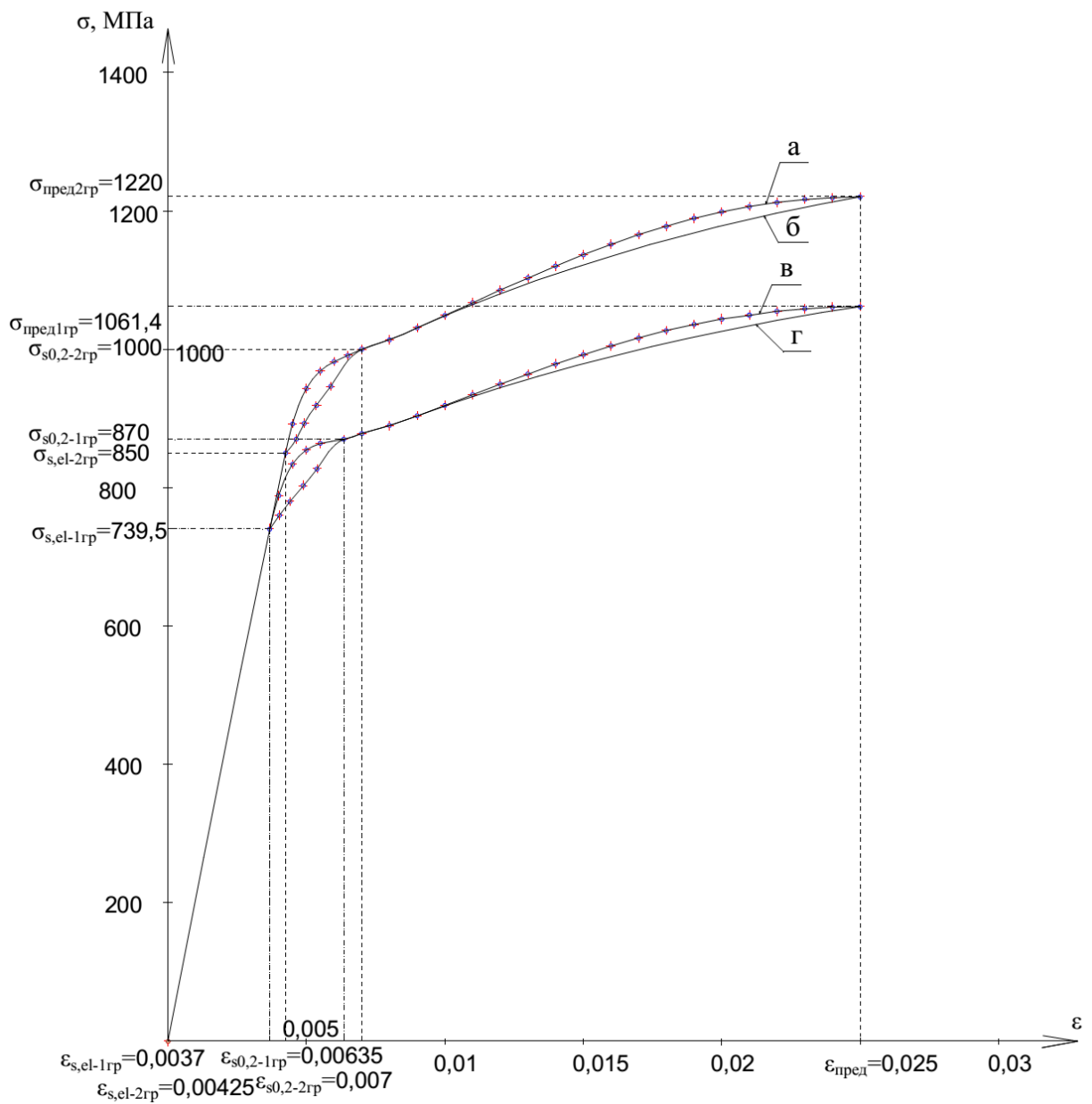
- а) расчет по второй группе предельных состояний через деформации;
- б) расчет по второй группе предельных состояний через напряжения;
- в) расчет по первой группе предельных состояний через деформации;
- г) расчет по первой группе предельных состояний через напряжения

Рисунок 13 – Диаграммы состояния растянутой арматуры класса А600



- а) расчет по второй группе предельных состояний через деформации;
- б) расчет по второй группе предельных состояний через напряжения;
- в) расчет по первой группе предельных состояний через деформации;
- г) расчет по первой группе предельных состояний через напряжения

Рисунок 14 – Диаграммы состояния растянутой арматуры класса А800



а) расчет по второй группе предельных состояний через деформации;
 б) расчет по второй группе предельных состояний через напряжения;
 в) расчет по первой группе предельных состояний через деформации;
 г) расчет по первой группе предельных состояний через напряжения

Рисунок 15 – Диаграммы состояния растянутой арматуры класса А1000

2.4 Описание диаграмм деформирования арматуры в соответствии с СНБ 5.03.01-02

2.4.1 Арматура для конструкций без предварительного напряжения

В качестве ненапрягаемой арматуры железобетонных конструкций следует применять арматуру классов А240, А400 и А500. По способу производства арматура может быть горячекатаной, термомеханически упрочненной и холоднодеформированной. Требования к механическим свойствам арматуры регламентируются соответствующими стандартами. [9]

Нормативное сопротивление арматуры $f_{yk}(f_{0,2k})$ — наименьшее контролируемое значение физического или условного предела текучести, равного значению напряжений, соответствующих остаточному относительному удлинению, равному 0,2 %. Указанные контролируемые характеристики гарантируются заводами-изготовителями с обеспеченностью не менее 0,95.

Расчетное сопротивление арматуры f_{yd} определяют путем деления нормативного сопротивления $f_{yk}(f_{0,2k})$ на частный коэффициент безопасности по арматуре γ_s , принимаемый равным 1,1 для стержневой и 1,2 — для проволочной арматуры.

При расчете по наклонным сечениям расчетные сопротивления поперечной арматуры (хомутов и отогнутых стержней) f_{ywd} снижаются по сравнению с f_{yd} путем умножения на коэффициенты условий работы γ_{s1} и γ_{s2} :

а) $\gamma_{s1} = 0,8$ — для учета неравномерности распределения напряжений в арматуре по длине рассматриваемого сечения;

б) $\gamma_{s2} = 0,9$ — для стержневой арматуры диаметром менее 1/3 диаметра продольных стержней в сварных каркасах, для учета возможности хрупкого разрушения сварного соединения.

Характеристики ненапрягаемой арматуры представлены в таблице 4.

Таблица 4 — Характеристики ненапрягаемой арматуры

Класс арматуры	Номинальный диаметр, мм	Вид поверхности	$k = f_{tk} / f_{yk}$	Нормативное сопротивление $f_{yk}(f_{0,2k})$, Н/мм ²	Расчетное сопротивление $f_{yd}(f_{0,2d})$, Н/мм ²	Расчетное сопротивление поперечной арматуры f_{ywd} , Н/мм ²	
A240	5,5—40,0	Гладкая	1,08	240	218	174*	157
A400	6,0—40,0	Периодического профиля	1,05	400	365	290*	263
* Для случая применения в вязаных каркасах. ** В скобках приведены значения для проволочной арматуры.							

Зависимость « σ_s — ε_s » для арматуры классов A240, A400 следует принимать с горизонтальным участком от ε_{sy} до ε_{su} (рис. 16).

Модуль упругости арматуры E_s в интервале температур от минус 30 до плюс 200 °С следует принимать равным 200 кН/мм².

2.4.2 Арматура для предварительно напряженных конструкций

В качестве напрягаемой арматуры предварительно напряженных конструкций следует применять стержни и канаты классов S800, S1200, S1400. По способу производства арматура может быть горячекатаной, термомеханически упрочненной и холоднодеформированной. Требования к механическим свойствам арматуры регламентируются соответствующими стандартами.

Нормативное сопротивление арматуры $f_{0,2k}$ — наименьшее контролируемое значение условного предела текучести, равного значению напряжений, соответствующих остаточному относительному удлинению, равному 0,2 %. Указанная характеристика гарантируется заводом-изготовителем с обеспеченностью не менее 0,95.

Расчетное сопротивление арматуры $f_{0,2d}$ определяют путем деления нормативного сопротивления $f_{0,2k}$ на частный коэффициент безопасности по арматуре γ_s , равный 1,2 [9].

Характеристики напрягаемой арматуры приведены в таблице 5.

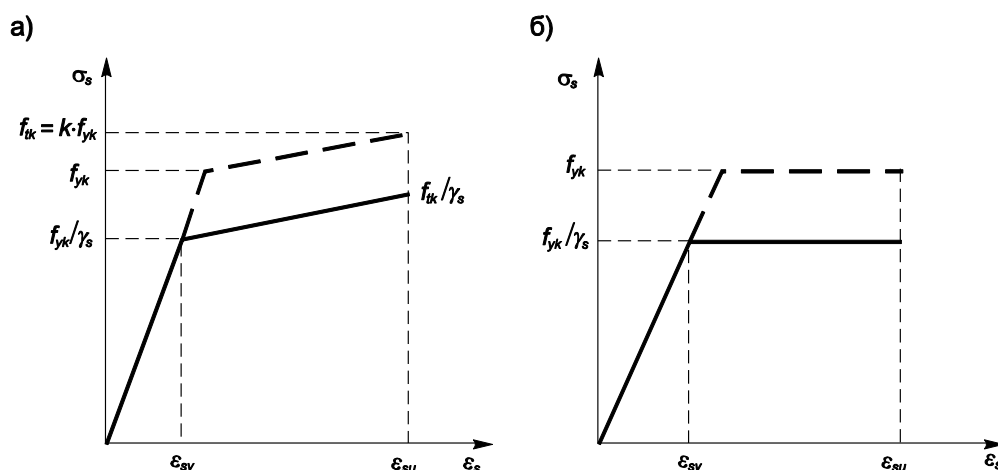


Рисунок 16 - Зависимость « σ_s — ε_s » для ненапрягаемой арматуры

Таблица 5 — Характеристики напрягаемой арматуры

Класс арматуры	Номинальный диаметр, мм	$k = f_{tk}/f_{yk}$	Нормативное сопротивление f_{yk} ($f_{0,2k}$), Н/мм ²	Расчетное сопротивление f_{yd} ($f_{0,2d}$), Н/мм ²
A800	10 — 32	1,1	800	665
A1200	6 — 32	1,1	1000	800
A1400	3 — 15	1,1	1400	1165

Зависимость « σ_s — ε_s » для напрягаемой арматуры предварительно напряженных конструкций следует принимать в соответствии с диаграммой (рис. 17)

Модуль деформаций для горячекатаной, термомеханически упрочненной и холоднодеформированной арматуры следует принимать равным 200 кН/мм², для арматурных канатов — 190 кН/мм².

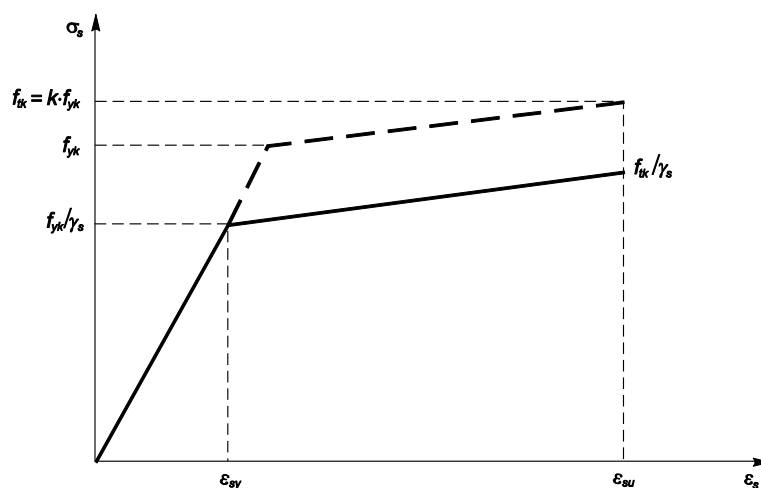


Рисунок 17 - Зависимость « σ_s — ε_s » для напрягаемой арматуры

2.4.3 Построение диаграмм деформирования арматуры в соответствии с СНБ 5.03.01-02

После расчетов (приложение Б), описанных выше, строим диаграммы для арматуры классов А240, А400, А600, А800, А1000 (рис. 18-22).

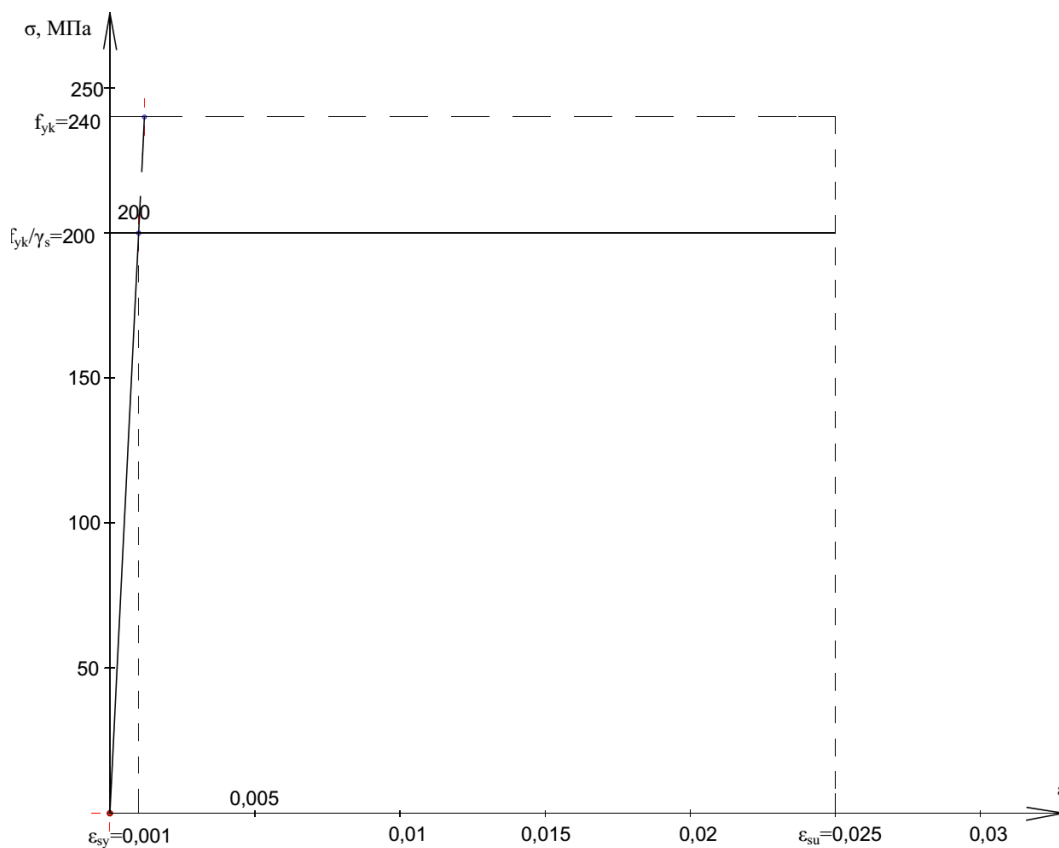


Рисунок 18 – Диаграмма состояния растянутой арматуры класса А240

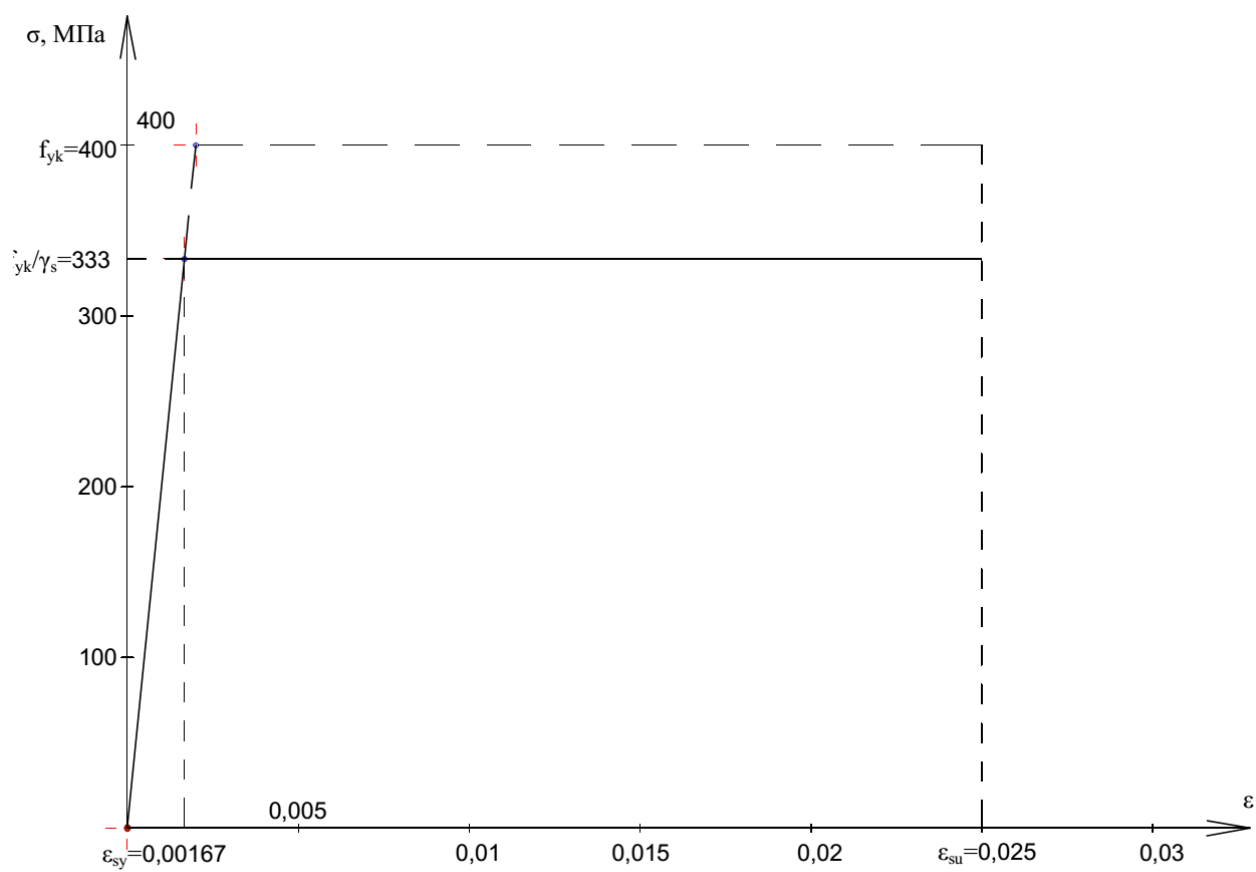


Рисунок 19 – Диаграмма состояния растянутой арматуры класса А400

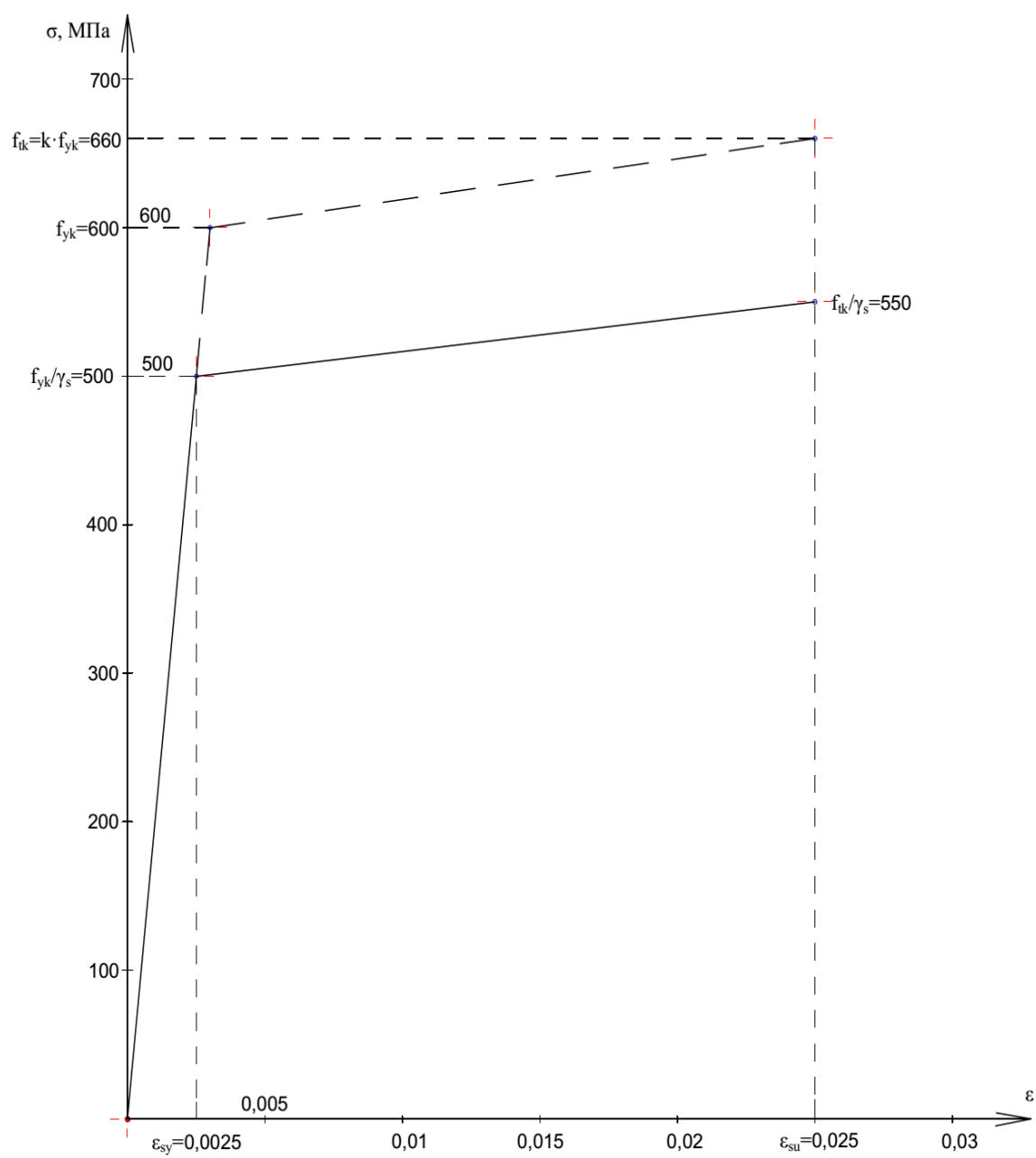


Рисунок 20 – Диаграмма состояния растянутой арматуры класса А600

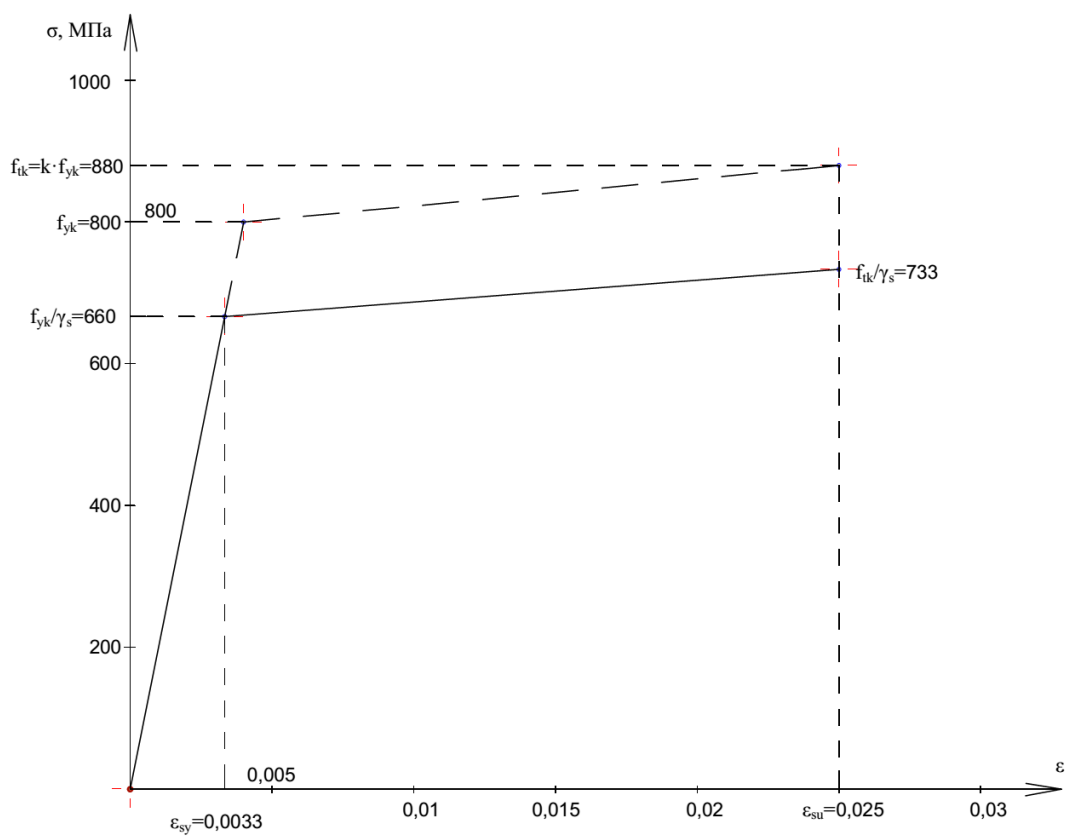


Рисунок 21 – Диаграмма состояния растянутой арматуры класса А800

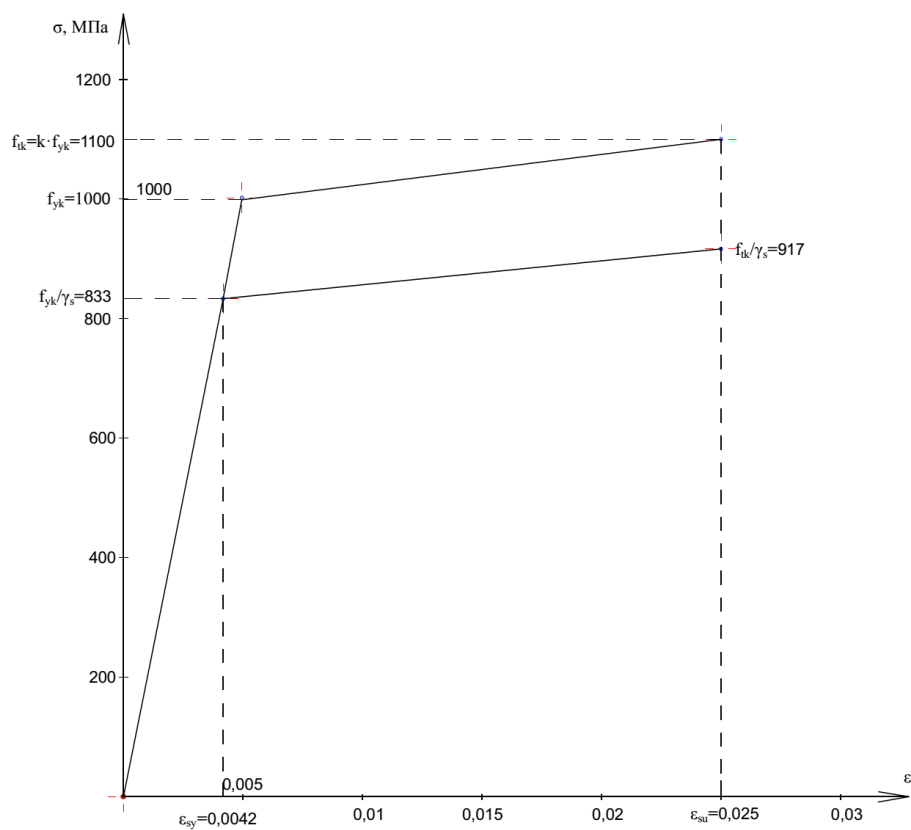


Рисунок 22 – Диаграмма состояния растянутой арматуры класса А1000

2.5 Выводы ко второй главе

В данной главе рассмотрены вопросы, касающиеся построения различных видов диаграмм деформирования арматуры, в частности:

- двухлинейные и трехлинейные диаграммы деформирования арматуры;
- криволинейные диаграммы деформирования арматуры.

В соответствии с теорией, изложенной по данным вопросам, построены диаграммы состояния растянутой арматуры для классов А240, А400, А600, А800, А1000, которые являются основополагающими для расчета железобетонного сечения.

Глава 3 Расчетные зависимости описания диаграмм деформирования бетона в отечественных нормах

Бетон – искусственный материал, состоящий из заполнителей природного характера в комплексе которые образуют единую монолитную схему в составе которой лежат 3 компонента, благодаря которым материал имеет повышенную прочность: крупный заполнитель, мелкие заполнитель и связующее вещество. Прочность и плотность бетона зависят от вида крупного заполнителя. Чаще всего используются заполнители диаметром $d_3 = 10 \dots 40$ мм в виде гравия или щебня из плотных горных пород (для тяжелых бетонов плотностью $2,2 \dots 2,4$ т/м³) или пористых каменных материалов естественного или искусственного происхождения типа керамзита, перлита, аглоперита (для легких бетонов плотностью $1,3 \dots 1,8$ т/м³). Плотность заполнителя влияет на характер разрушения структуры бетона. Различают две схемы разрушения – по матрице в обход зерен плотного заполнителя и с разрывом матрицы и зерен пористого заполнителя.

Матрицу цементно-песчаного раствора можно рассматривать как менее крупную структуру – мезоструктуру, где в качестве заполнителя выступают частицы песка 2 – 5 мм, а в качестве матрицы – затвердевший цементный камень. Цементный камень имеет весьма сложную и довольно тонкую структуру более мелкого масштаба – микроструктуру. Заполнителем в этой структуре является непрогидратированные зерна цемента, а в качестве матрицы – сростки субмикрокристаллов. В свою очередь матрице субмикрокристаллов свойственны также микротрещины, поры, капиллярные пустоты с заполнением газообразной и остаточной (после твердения) жидкой, а также некоторой полужидкой (аморфной) фазами.

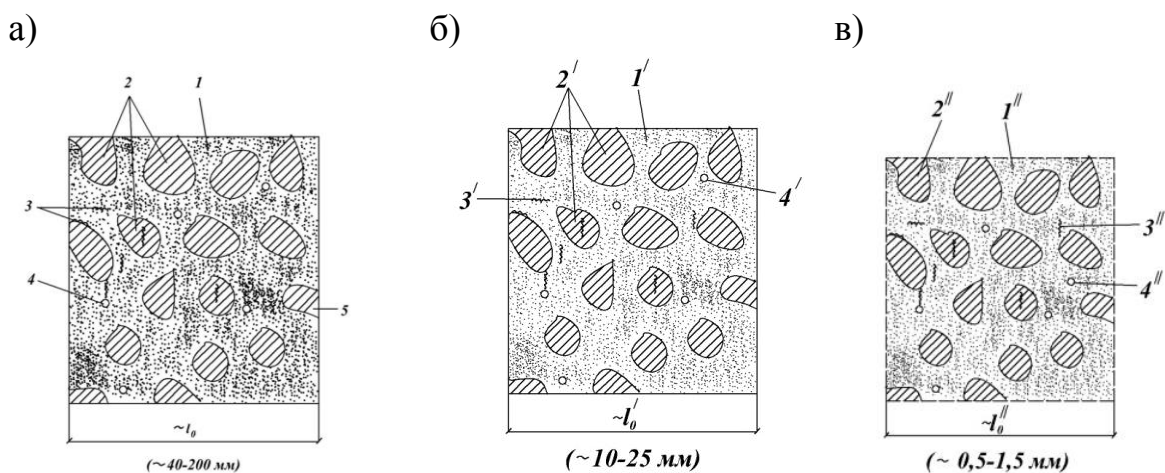


Рисунок 23 - Структура бетона (а) и его компонент (б, в)

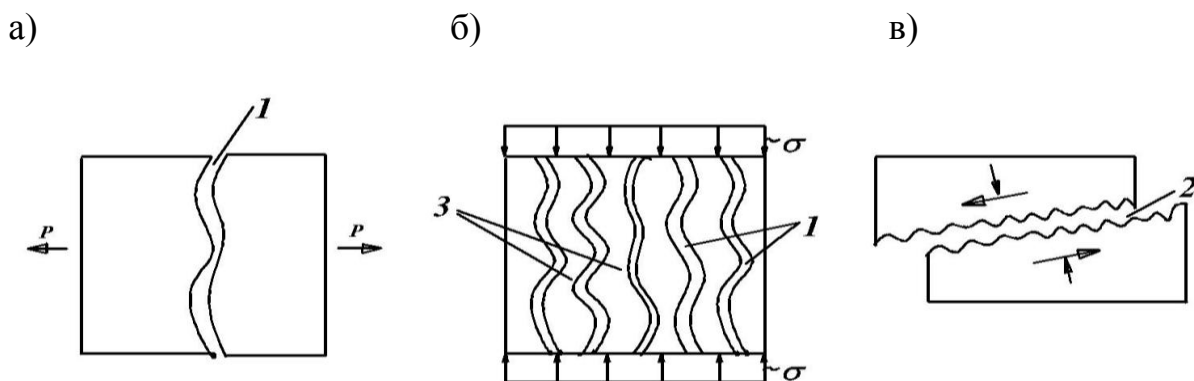
С этими фазами связаны важные свойства бетона, такие как ползучесть, усадка, набухание и др. Структура цементного бетона связана с его возрастом и условиями твердения. С точки зрения механики твердого тела бетонам присущи некоторые общие основополагающие свойства: локальная неоднородность, трещиноватость, физическая нелинейность (нелинейность связей между напряжениями и деформациями), конструкционная и приобретаемая анизотропия.

Разрушение бетона как материала начинается с микроразрушений отдельных элементов его структуры, которые затем развиваются и приводят к разрушению более крупных объемов, к потере несущей способности конструкций.

Источником микроразрушений являются дефекты структуры бетона (микротрещины, поры, полости), где при нагружении элемента концентрируются напряжения. Коэффициент концентрации напряжений (коэффициент превышения их средних напряжений по площади нагружения элемента) для пор в упругом материале составляет 3-10, а в вершинах трещин он может достигать $10^2 - 10^3$. Поэтому, при небольших значениях средних растягивающих напряжений в элементе, у кончиков трещин, напряжения могут достигать предельных значений, и в хрупких материалах появляется тенденция к неограниченному росту трещин (развитие трещин в

упругих материалах моделируется методами механики разрушения, которая в последние десятилетия успешно развивается). Этим во многом объясняется низкая прочность бетона на растяжение по сравнению со сжатием, однако фактическая прочность бетона на растяжение с учётом тех же значений коэффициентов концентрации напряжений значительно выше, чем у хрупких материалов. Бетон при растяжении и сжатии ведёт себя как нелинейный материал. Объясняется это тем, что в отличие от однородных упругих материалов (сталь, стекло и т.д.) микротрещины в бетоне на своём пути развития встречают преграды в виде зёрен заполнителя, трещин иного направления, пор, разрыхлённых участков цементного камня и тормозятся; уменьшается концентрация напряжений.

Таким образом, неоднородная структура бетона, с одной стороны, является причиной возникновения внутренних трещин, а с другой – фактором, препятствующим их развитию. Существует два механизма разрушения, когда микротрещины объединяются в магистральную: отрывной (рис.24, а, б); сдвиговой (рис. 25, в).



а, б - отрывной; в - сдвиговой 1 - трещины отрыва одной части элемента от другой; 2 - трещина сдвига; 3 - полосы бетона между трещинами отрыва

Рисунок 24 - Механизм разрушения бетона

Отрывной механизм реализуется при осевом растяжении элемента или в средней части линейного элемента при сжатии, когда его часть разделяется трещинами на полосы по направлению действия силы, которые могут

разрушаться от потери устойчивости. Данный механизм разрушения бетона является основным при построении диаграмм деформирования бетона.

3.1 Описание двухлинейных диаграмм деформирования бетона по СП 63.13330.2012

В качестве расчетных диаграмм состояния бетона, определяющих связь между напряжениями и относительными деформациями, в нормативной литературе принимают трехлинейную и двухлинейную диаграммы. Диаграммы состояния бетона используют при расчете железобетонных элементов по нелинейной деформационной модели.

Принцип построения двухлинейной диаграммы деформирования бетона (рис. 25) заключается в построении диаграммы, показывающую зависимость напряжения от относительных деформаций бетона с помощью двух линий. В отечественной нормативной литературе приводится в СП 63.13330-2012. Зависимость уровня сжимающего напряжения σ_b от относительных деформаций бетона ε_b определяются по формулам [10]:

При $0 \leq \varepsilon_b \leq \varepsilon_{b1}$, где $\varepsilon_{b1} = \frac{\sigma_{b1}}{E_b}$

$$\sigma_b = E_{b,red} \varepsilon_b, \quad (49)$$

где $E_{b,red}$ – начальный модуль упругости;

ε_{b1} – относительные деформации бетона;

R_b – расчетное сопротивление бетона.

При $\varepsilon_{b1} \leq \varepsilon_b \leq \varepsilon_{b2}$

$$\sigma_b = R_b \quad (50)$$

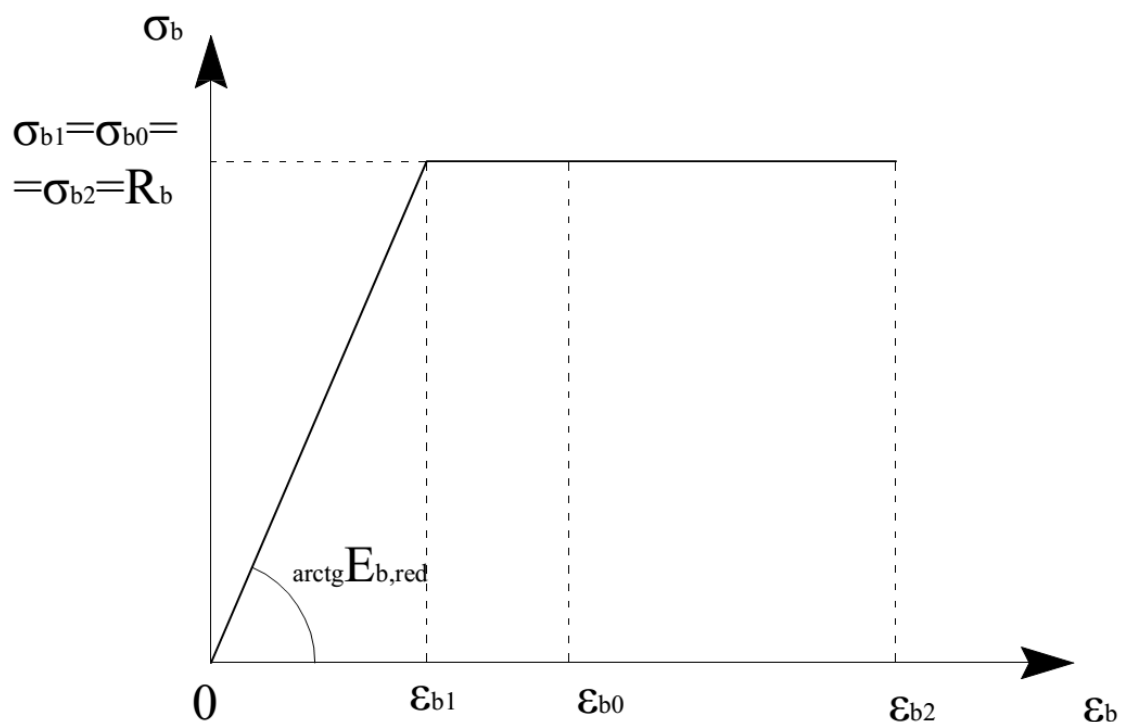


Рисунок 25 - Двухлинейная диаграмма деформирования бетона на сжатие

3.2 Описание трехлинейных диаграмм деформирования бетона по СП 63.13330.2012

Принцип построения трехлинейной диаграммы (рис. 26) заключается в построении диаграммы, показывающие зависимость напряжения от относительных деформаций бетона с помощью трех линий. В отечественной нормативной литературе также приводится нормативном документе в СП 63.13330.2012 «Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения». Зависимость уровня сжимающего напряжения σ_b от относительных деформаций бетона ε_b определяются по формулам [10]:

При $0 \leq \varepsilon_b \leq \varepsilon_{b1}$

$$\sigma_b = E_b \varepsilon_b, \quad (51)$$

При $\varepsilon_{b1} \leq \varepsilon_b \leq \varepsilon_{b0}$

$$\sigma_b = 1 - \frac{\sigma_{b1}}{R_b} \frac{\varepsilon_b - \varepsilon_{b1}}{\varepsilon_{b0} - \varepsilon_{b1}} + \frac{\sigma_{b1}}{R_b} R_b, \quad (52)$$

где ε_{b0} – относительные деформации;

E_b – модуль упругости.

При $\varepsilon_{b0} \leq \varepsilon_b \leq \varepsilon_{b2}$; $\sigma_b = R_b$

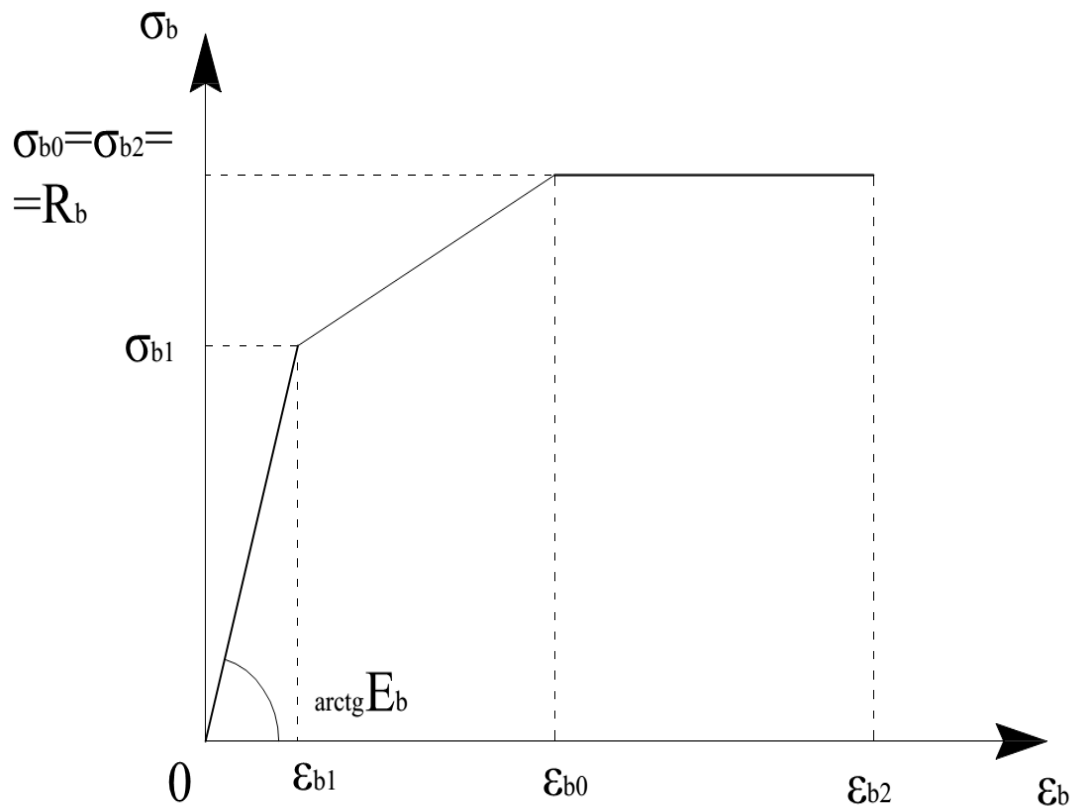


Рисунок 26 - Трехлинейная диаграмма деформирования бетона на сжатие

Линейные диаграммы учитывают только нелинейность деформаций ползучести и не описывают нелинейность упруго – мгновенных деформаций. В расчетах на прочность при проектировании конструкций на длительные эксплуатационные нагрузки статического характера такой подход вполне объясним. При кратковременных нагружениях, нагрузках динамического, сейсмического характера, изменяющихся по некоторым циклическим закономерностям, расчет конструкций необходимо выполнять с учетом

необратимости части нелинейных упруго - мгновенных деформаций, их деформаций 2-го рода и псевдопластических деформаций.

Бетон в этом случае характеризуется нелинейными зависимостями между напряжениями и деформациями (нелинейными физическими соотношениями), а диаграммы имеют криволинейный вид.

3.3 Выводы к третьей главе

Построение диаграмм деформирования бетона осуществляется разными способами, с разными коэффициентами, влияющие на точность построения диаграмм деформирования бетона и образуют отклонения, которые не позволяют точно описать зависимость $\varepsilon_b - \sigma_b$. Прямолинейные диаграммы деформирования бетона являются простейшими и имеют большие погрешности, но из-за своей простоты являются основными при расчете сечения.

Глава 4 Расчет сечения железобетонного элемента по прочности

4.1 Уравнение равновесия внутренних усилий в нормальном сечении железобетонного элемента

Основная задача при расчете бетона по прочности состоит в проверке условия равновесия:

$$\frac{b \times R_b}{10 \cdot 1} \frac{1}{\rho} (10\varepsilon_{bu} - 2\varepsilon_{b0} - 5\varepsilon_{b1}) + \sum_{i=1}^n A_{si} \times \sigma_{si} + \sum_{i=1}^n A_{si}' \times \sigma_{si}' = 0, \quad (53)$$

$$A_s = \frac{\pi D^2}{4}, \quad (54)$$

где R_b - расчетное сопротивление бетона осевому сжатию;
 ρ - радиус кривизны;

$$\frac{1}{\rho} = \frac{\varepsilon_b + \varepsilon_s}{h_0}, \quad (55)$$

ε_{bu} - предельные деформации бетона;

ε_{b0} - предельные относительные деформации бетона;

ε_{b1} - относительные деформации бетона;

$$\varepsilon_{b1} = \frac{0,6\sigma_b}{E_b}, \quad (56)$$

A_s - площадь сечения арматурного стержня;

σ_s - напряжение в арматуре;

ε_s - предельные деформации арматуры;

4.2 Расчет прочности железобетонного элемента по трехлинейной диаграмме

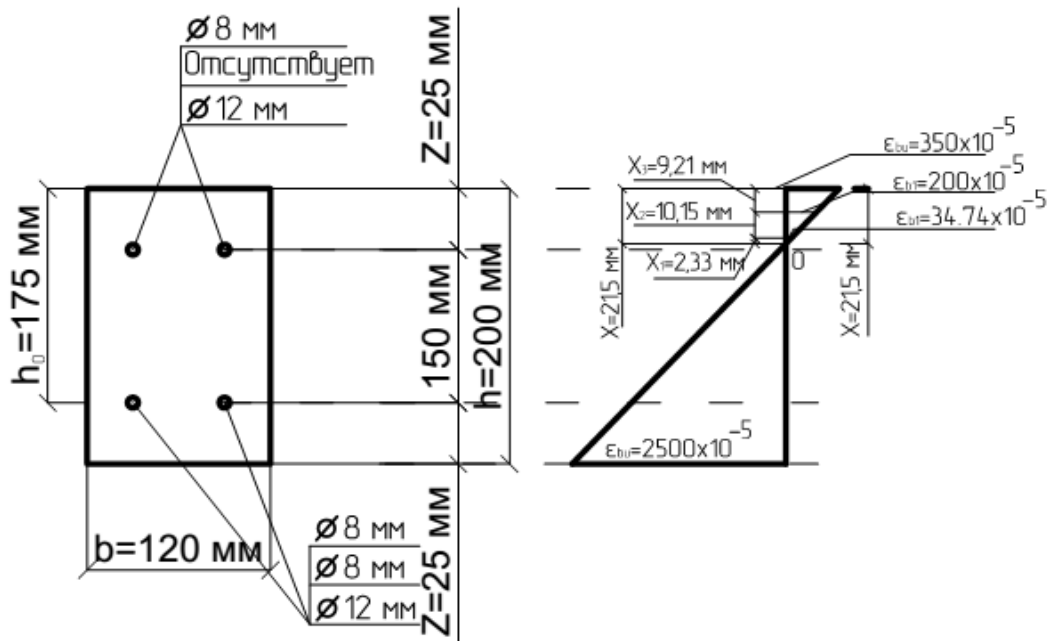


Рисунок 27 - Расчетное сечение и эпюра деформаций

$$R_b = 165 \text{ кг/см}^2;$$

$$1 \quad \rho = \frac{350 \cdot 10^{-5} + 2500 \cdot 10^{-5}}{17,5} = 162,86$$

$$\varepsilon_{bu} = 350 \times 10^{-5};$$

$$\varepsilon_{b0} = 200 \times 10^{-5};$$

$$\varepsilon_{b1} = 34,74 \times 10^{-5};$$

$$\sigma_s = 4000 \text{ кг/см}^2$$

$$\varepsilon_s = 2500 \cdot 10^{-5}$$

а) Арматура в сечении: нижняя – $\varnothing 8$ мм, верхняя $\varnothing 8$ мм

$$A_s = 0,5 \text{ см}^2;$$

Проверка условия равновесия:

$$\frac{12 \times 165}{10 \cdot 162,86 \cdot 10^{-5}} 10 \cdot 350 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 200 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 34,74 \cdot 10^{-5} - 4 \cdot 0,5 \cdot 4000 = -4442,24 \neq 0$$

Левая часть уравнения < 0 , что свидетельствует о перearмировании.

Для реализации случая перearмирования, необходимо выполнить следующие операции:

Приближение 1:

$$\Delta \varepsilon_s = 0,1 \times 2500 \cdot 10^{-5} = 250 \cdot 10^{-5}$$

$$\varepsilon_s = 2500 \cdot 10^{-5} - 250 \cdot 10^{-5} = 2250 \cdot 10^{-5}$$

$$1 \quad \rho = \frac{350 \cdot 10^{-5} + 2250 \cdot 10^{-5}}{17,5} = 148,57$$

$$\frac{12 \times 165}{10 \cdot 148,57 \cdot 10^{-5}} \quad 10 \cdot 350 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 200 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 34,74 \cdot 10^{-5} - 4 \cdot 0,5 \cdot 4000 = -4100,14 \neq 0$$

Приближение 2:

$$\varepsilon_s = 2250 \cdot 10^{-5} - 250 \cdot 10^{-5} = 2000 \cdot 10^{-5}$$

$$1 \quad \rho = \frac{315 \cdot 10^{-5} + 2000 \cdot 10^{-5}}{17,5} = 134,29$$

$$\frac{12 \times 165}{10 \cdot 134,29 \cdot 10^{-5}} \quad 10 \cdot 350 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 200 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 34,74 \cdot 10^{-5} - 4 \cdot 0,5 \cdot 4000 = -3685,26 \neq 0$$

Приближение 3:

$$\varepsilon_s = 2000 \cdot 10^{-5} - 250 \cdot 10^{-5} = 1750 \cdot 10^{-5}$$

$$1 \quad \rho = \frac{350 \cdot 10^{-5} + 1750 \cdot 10^{-5}}{17,5} = 120$$

$$\frac{12 \times 165}{10 \cdot 120 \cdot 10^{-5}} \quad 10 \cdot 350 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 200 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 34,74 \cdot 10^{-5} - 4 \cdot 0,5 \cdot 4000 = -3171,61 \neq 0$$

Приближение 4:

$$\varepsilon_s = 1750 \cdot 10^{-5} - 250 \cdot 10^{-5} = 1500 \cdot 10^{-5}$$

$$1 \quad \rho = \frac{350 \cdot 10^{-5} + 1500 \cdot 10^{-5}}{17,5} = 105,71$$

$$\frac{12 \times 165}{10 \cdot 105,71 \cdot 10^{-5}} 10 \cdot 350 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 200 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 34,74 \cdot 10^{-5} - 4 \cdot 0,5 \cdot 4000 = -2519,12 \neq 0$$

Приближение 5:

$$\varepsilon_s = 1500 \cdot 10^{-5} - 250 \cdot 10^{-5} = 1250 \cdot 10^{-5}$$

$$1 \rho = \frac{350 \cdot 10^{-5} + 1250 \cdot 10^{-5}}{17,5} = 91,43$$

$$\frac{12 \times 165}{10 \cdot 91,43 \cdot 10^{-5}} 10 \cdot 350 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 200 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 34,74 \cdot 10^{-5} - 4 \cdot 0,5 \cdot 4000 = -1662,73 \neq 0$$

Приближение 6:

$$\varepsilon_s = 1250 \cdot 10^{-5} - 250 \cdot 10^{-5} = 1000 \cdot 10^{-5}$$

$$1 \rho = \frac{350 \cdot 10^{-5} + 1000 \cdot 10^{-5}}{17,5} = 77,14$$

$$\frac{12 \times 165}{10 \cdot 77,14 \cdot 10^{-5}} 10 \cdot 350 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 200 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 34,74 \cdot 10^{-5} - 4 \cdot 0,5 \cdot 4000 = -489,163 \neq 0$$

Приближение 7:

$$\varepsilon_s = 1000 \cdot 10^{-5} - 250 \cdot 10^{-5} = 750 \cdot 10^{-5}$$

$$1 \rho = \frac{350 \cdot 10^{-5} + 750 \cdot 10^{-5}}{17,5} = 62,86$$

$$\frac{12 \times 165}{10 \cdot 62,86 \cdot 10^{-5}} 10 \cdot 350 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 200 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 34,74 \cdot 10^{-5} - 4 \cdot 0,5 \cdot 4000 = 1217,85 \neq 0$$

Знак изменился, уточняем коэффициент:

$$\text{Принимаем } \varepsilon_s = 917,45 \cdot 10^{-5}$$

$$1 \rho = \frac{350 \cdot 10^{-5} + 917,45 \cdot 10^{-5}}{17,5} = 72,43 \cdot 10^{-5}$$

$$\frac{12 \times 165}{10 \cdot 72,43 \cdot 10^{-5}} 10 \cdot 350 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 200 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 34,74 \cdot 10^{-5} - 4 \cdot 0,5 \cdot 4000 = 0$$

Составим уравнение моментов относительно точки О:

$$M_{ult} = \frac{12 \times 165}{10 \cdot (72,43 \cdot 10^{-5})^2} \cdot 5 \cdot (350 \cdot 10^{-5})^2 - (200 \cdot 10^{-5})^2 - 2 \cdot (34,74 \cdot 10^{-5})^2 + 2 \cdot 0,5 \cdot 4000 \cdot 17,5 - 2,15 + 2 \cdot 0,5 \cdot 4000 \cdot 2,5 - 2,15 = 82316,36 = 8,23 \text{ кН} \cdot \text{м}$$

б) Арматура в сечении: нижняя – $\varnothing 8 \text{ мм}$, верхняя отсутствует.

$$A_s = 0,5 \text{ см}^2;$$

Проверка условия равновесия:

$$\frac{12 \times 165}{10 \cdot 162,86 \cdot 10^{-5}} \cdot 10 \cdot 350 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 200 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 34,74 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 0,5 \cdot 4000 = -442,24 \neq 0$$

Левая часть уравнения < 0 , что свидетельствует о переармировании.

Приближение 1:

$$\Delta \varepsilon_s = 0,1 \times 2500 \cdot 10^{-5} = 250 \cdot 10^{-5}$$

$$\varepsilon_s = 2500 \cdot 10^{-5} - 250 \cdot 10^{-5} = 2250 \cdot 10^{-5}$$

$$\rho = \frac{350 \cdot 10^{-5} + 2250 \cdot 10^{-5}}{17,5} = 148,57$$

$$\frac{12 \times 165}{10 \cdot 148,57 \cdot 10^{-5}} \cdot 10 \cdot 350 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 200 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 34,74 \cdot 10^{-5} - 4 \cdot 0,5 \cdot 4000 = -100,14 \neq 0$$

Приближение 2:

$$\varepsilon_s = 2250 \cdot 10^{-5} - 250 \cdot 10^{-5} = 2000 \cdot 10^{-5}$$

$$\rho = \frac{315 \cdot 10^{-5} + 2000 \cdot 10^{-5}}{17,5} = 134,29$$

$$\frac{12 \times 165}{10 \cdot 134,29 \cdot 10^{-5}} \cdot 10 \cdot 350 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 200 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 34,74 \cdot 10^{-5} - 4 \cdot 0,5 \cdot 4000 = 314,74 \neq 0$$

Знак изменился, уточняем коэффициент:

$$\text{Принимаем } \varepsilon_b = 2184,91 \cdot 10^{-5}$$

$$1 \quad \rho = \frac{317,58 \cdot 10^{-5} + 2184,91 \cdot 10^{-5}}{17,5} = 144,85 \cdot 10^{-5}$$

$$\frac{12 \times 165}{10 \cdot 144,85 \cdot 10^{-5}} \cdot 10 \cdot 317,58 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 200 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 34,74 \cdot 10^{-5} - 4 \cdot 0,5 \cdot 4000 = 0$$

Составим уравнение моментов относительно точки О:

$$M_{ult} = \frac{12 \times 165}{10 \cdot (161,0 \cdot 10^{-5})^2} \cdot 5 \cdot (317,58 \cdot 10^{-5})^2 - (200 \cdot 10^{-5})^2 - 2 \cdot (34,74 \cdot 10^{-5})^2 + 2 \cdot 0,5 \cdot 4000 \cdot 17,5 - 2,15 = 65758,62$$

$$= 6,58 \text{ кН} \cdot \text{м}$$

в) Арматура в сечении: нижняя – $\varnothing 12 \text{ мм}$, верхняя – $\varnothing 8 \text{ мм}$.

$$A_s = 0,5 \text{ см}^2;$$

Проверка условия равновесия:

$$\frac{12 \times 165}{10 \cdot 162,86 \cdot 10^{-5}} \cdot 10 \cdot 350 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 200 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 34,74 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 0,5 \cdot 4000 - 2 \cdot 1,13 \cdot 4000 = -9482,24 \neq 0$$

Левая часть уравнения < 0 , что свидетельствует о переармировании.

Приближение 1:

$$\Delta \varepsilon_s = 0,1 \times 2500 \cdot 10^{-5} = 250 \cdot 10^{-5}$$

$$\varepsilon_s = 2500 \cdot 10^{-5} - 250 \cdot 10^{-5} = 2250 \cdot 10^{-5}$$

$$1 \quad \rho = \frac{350 \cdot 10^{-5} + 2250 \cdot 10^{-5}}{17,5} = 148,57$$

$$\frac{12 \times 165}{10 \cdot 148,57 \cdot 10^{-5}} \cdot 10 \cdot 350 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 200 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 34,74 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 0,5 \cdot 4000 - 2 \cdot 1,13 \cdot 4000 = -9140,14 \neq 0$$

Приближение 2:

$$\varepsilon_s = 2250 \cdot 10^{-5} - 250 \cdot 10^{-5} = 2000 \cdot 10^{-5}$$

$$1 \quad \rho = \frac{315 \cdot 10^{-5} + 2000 \cdot 10^{-5}}{17,5} = 134,29$$

$$\frac{12 \times 165}{10 \cdot 134,29 \cdot 10^{-5}} 10 \cdot 350 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 200 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 34,74 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 0,5 \cdot 4000 - 2 \cdot 1,13 \cdot 4000 = -8725,26 \neq 0$$

Приближение 3:

$$\varepsilon_s = 2000 \cdot 10^{-5} - 250 \cdot 10^{-5} = 1750 \cdot 10^{-5}$$

$$1 \quad \rho = \frac{350 \cdot 10^{-5} + 1750 \cdot 10^{-5}}{17,5} = 120$$

$$\frac{12 \times 165}{10 \cdot 120 \cdot 10^{-5}} 10 \cdot 350 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 200 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 34,74 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 0,5 \cdot 4000 - 2 \cdot 1,13 \cdot 4000 = -8211,611 \neq 0$$

Приближение 4:

$$\varepsilon_s = 1750 \cdot 10^{-5} - 250 \cdot 10^{-5} = 1500 \cdot 10^{-5}$$

$$1 \quad \rho = \frac{350 \cdot 10^{-5} + 1500 \cdot 10^{-5}}{17,5} = 105,71$$

$$\frac{12 \times 165}{10 \cdot 105,71 \cdot 10^{-5}} 10 \cdot 350 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 200 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 34,74 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 0,5 \cdot 4000 - 2 \cdot 1,13 \cdot 4000 = -7559,12 \neq 0$$

Приближение 5:

$$\varepsilon_s = 1500 \cdot 10^{-5} - 250 \cdot 10^{-5} = 1250 \cdot 10^{-5}$$

$$1 \quad \rho = \frac{350 \cdot 10^{-5} + 1250 \cdot 10^{-5}}{17,5} = 91,43$$

$$\frac{12 \times 165}{10 \cdot 91,43 \cdot 10^{-5}} 10 \cdot 350 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 200 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 34,74 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 0,5 \cdot 4000 - 2 \cdot 1,13 \cdot 4000 = -6702,73 \neq 0$$

Приближение 6:

$$\varepsilon_s = 1250 \cdot 10^{-5} - 250 \cdot 10^{-5} = 1000 \cdot 10^{-5}$$

$$1 \quad \rho = \frac{350 \cdot 10^{-5} + 1000 \cdot 10^{-5}}{17,5} = 77,14$$

$$\frac{12 \times 165}{10 \cdot 77,14 \cdot 10^{-5}} 10 \cdot 350 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 200 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 34,74 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 0,5 \cdot 4000 - 2 \cdot 1,13 \cdot 4000 = -5529,16 \neq 0$$

Приближение 7:

$$\varepsilon_s = 1000 \cdot 10^{-5} - 250 \cdot 10^{-5} = 750 \cdot 10^{-5}$$

$$1 \quad \rho = \frac{350 \cdot 10^{-5} + 750 \cdot 10^{-5}}{17,5} = 62,86$$

$$\frac{12 \times 165}{10 \cdot 62,86 \cdot 10^{-5}} \quad 10 \cdot 350 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 200 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 34,74 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 0,5 \cdot 4000 - 2 \cdot 1,13 \cdot 4000 = -3822,16 \neq 0$$

Приближение 8:

$$\varepsilon_s = 750 \cdot 10^{-5} - 250 \cdot 10^{-5} = 500 \cdot 10^{-5}$$

$$1 \quad \rho = \frac{350 \cdot 10^{-5} + 500 \cdot 10^{-5}}{17,5} = 48,57$$

$$\frac{12 \times 165}{10 \cdot 48,57 \cdot 10^{-5}} \quad 10 \cdot 350 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 200 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 34,74 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 0,5 \cdot 4000 - 2 \cdot 1,13 \cdot 4000 = -1111,02 \neq 0$$

Приближение 9:

$$\varepsilon_s = 500 \cdot 10^{-5} - 250 \cdot 10^{-5} = 250 \cdot 10^{-5}$$

$$1 \quad \rho = \frac{350 \cdot 10^{-5} + 250 \cdot 10^{-5}}{17,5} = 34,29$$

$$\frac{12 \times 165}{10 \cdot 34,29 \cdot 10^{-5}} \quad 10 \cdot 350 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 200 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 34,74 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 0,5 \cdot 4000 - 2 \cdot 1,13 \cdot 4000 = 3859,38 \neq 0$$

Знак изменился, уточняем коэффициент:

$$\text{Принимаем } \varepsilon_s = 427,58 \cdot 10^{-5}$$

$$1 \quad \rho = \frac{350 \cdot 10^{-5} + 427,58 \cdot 10^{-5}}{17,5} = 44,43 \cdot 10^{-5}$$

$$\frac{12 \times 165}{10 \cdot 44,43 \cdot 10^{-5}} \quad 10 \cdot 350 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 200 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 34,74 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 0,5 \cdot 4000 - 2 \cdot 1,13 \cdot 4000 = 0$$

Составим уравнение моментов относительно точки О:

$$M_{ult} = \frac{15 \times 165}{10 \cdot (55,54 \cdot 10^{-5})^2} \cdot 5 \cdot (350 \cdot 10^{-5})^2 - (200 \cdot 10^{-5})^2 - 2 \cdot (34,74 \cdot 10^{-5})^2 + 2 \cdot 1,13 \cdot 4000 \cdot 17,5 - 2,15 + 2 \cdot 0,5 \cdot 4000 \cdot 2,5 - 2,15 = 193345,2 = 19,33 \text{ кН} \cdot \text{м}$$

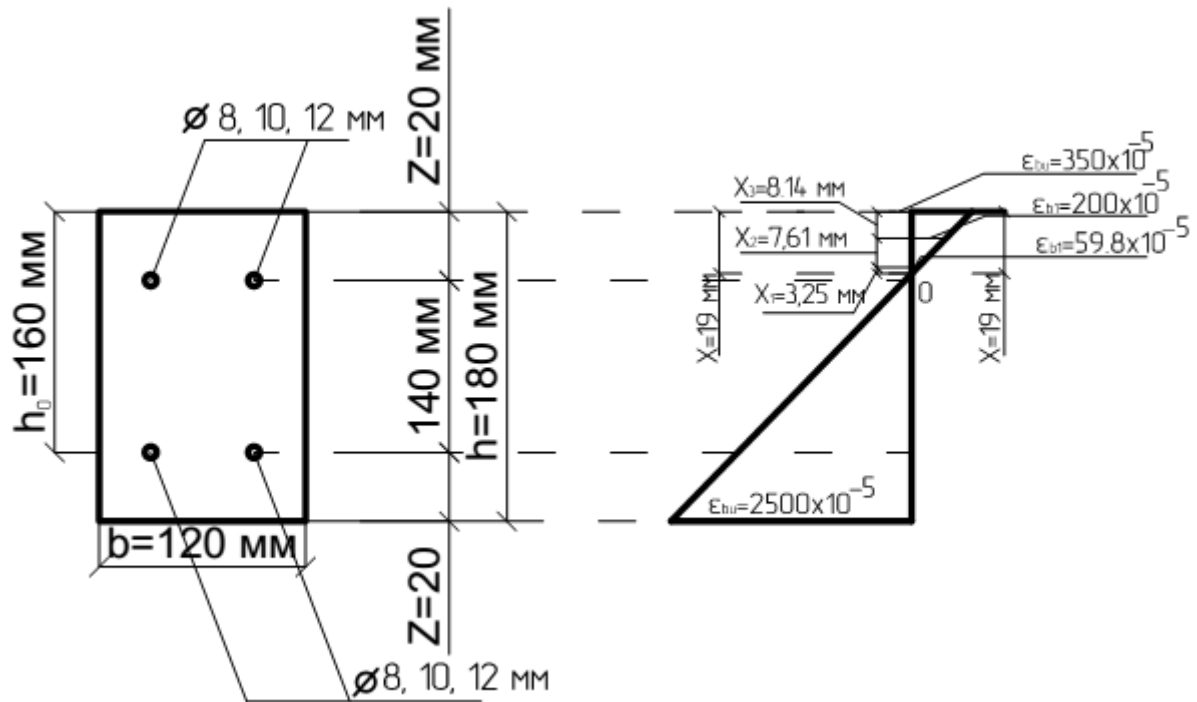


Рисунок 28 - Расчетное сечение и эпюра деформаций

$$R_b = 306 \text{ кг/см}^2;$$

$$\rho = \frac{350 \cdot 10^{-5} + 2500 \cdot 10^{-5}}{17,5} = 162,86$$

$$\varepsilon_{bu} = 350 \times 10^{-5};$$

$$\varepsilon_{b0} = 200 \times 10^{-5};$$

$$\varepsilon_{b1} = 59,8 \times 10^{-5};$$

$$\varepsilon_s = 2500 \cdot 10^{-5}$$

а) Арматура в сечении: нижняя – $\varnothing 8 \text{ мм}$, верхняя $\varnothing 8 \text{ мм}$

$$A_s = 0,5 \text{ см}^2;$$

$$\sigma_s = 4780 \text{ кг/см}^2$$

Проверка условия равновесия:

$$\frac{12 \times 306}{10 \cdot 178,13 \cdot 10^{-5}} 10 \cdot 350 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 200 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 59,8 \cdot 10^{-5} - 4 \cdot 0,5 \cdot 4780$$

$$= -3785,81 \neq 0$$

Левая часть уравнения < 0 , что свидетельствует о переармировании.

Приближение 1:

$$\Delta \varepsilon_s = 0,1 \times 2500 \cdot 10^{-5} = 250 \cdot 10^{-5}$$

$$\varepsilon_s = 2500 \cdot 10^{-5} - 250 \cdot 10^{-5} = 2250 \cdot 10^{-5}$$

$$1 \quad \rho = \frac{350 \cdot 10^{-5} + 2250 \cdot 10^{-5}}{16} = 162,5$$

$$\frac{12 \times 306}{10 \cdot 162,5 \cdot 10^{-5}} 10 \cdot 350 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 200 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 59,8 \cdot 10^{-5} - 4 \cdot 0,5 \cdot 4780$$

$$= -3230,6 \neq 0$$

Приближение 2:

$$\varepsilon_s = 2250 \cdot 10^{-5} - 250 \cdot 10^{-5} = 2000 \cdot 10^{-5}$$

$$1 \quad \rho = \frac{315 \cdot 10^{-5} + 2000 \cdot 10^{-5}}{16} = 146,88$$

$$\frac{12 \times 306}{10 \cdot 146,88 \cdot 10^{-5}} 10 \cdot 350 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 200 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 59,8 \cdot 10^{-5} - 4 \cdot 0,5 \cdot 4780$$

$$= -2557,26 \neq 0$$

Приближение 3:

$$\varepsilon_s = 2000 \cdot 10^{-5} - 250 \cdot 10^{-5} = 1750 \cdot 10^{-5}$$

$$1 \quad \rho = \frac{350 \cdot 10^{-5} + 1750 \cdot 10^{-5}}{16} = 131,25$$

$$\frac{12 \times 306}{10 \cdot 178,13 \cdot 10^{-5}} 10 \cdot 350 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 200 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 59,8 \cdot 10^{-5} - 4 \cdot 0,5 \cdot 4780$$

$$= -1723,6 \neq 0$$

Приближение 4:

$$\varepsilon_s = 1750 \cdot 10^{-5} - 250 \cdot 10^{-5} = 1500 \cdot 10^{-5}$$

$$1 \quad \rho = \frac{350 \cdot 10^{-5} + 1500 \cdot 10^{-5}}{16} = 115,63$$

$$\frac{12 \times 306}{10 \cdot 115,63 \cdot 10^{-5}} 10 \cdot 350 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 200 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 59,8 \cdot 10^{-5} - 4 \cdot 0,5 \cdot 4780$$

$$= -664,63 \neq 0$$

Приближение 5:

$$\varepsilon_s = 1500 \cdot 10^{-5} - 250 \cdot 10^{-5} = 1250 \cdot 10^{-5}$$

$$1 \quad \rho = \frac{350 \cdot 10^{-5} + 1250 \cdot 10^{-5}}{16} = 100$$

$$\frac{12 \times 306}{10 \cdot 100 \cdot 10^{-5}} 10 \cdot 350 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 200 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 59,8 \cdot 10^{-5} - 4 \cdot 0,5 \cdot 4780$$

$$= 725,27 \neq 0$$

Знак изменился, уточняем коэффициент:

$$\text{Принимаем } \varepsilon_s = 1371,38 \cdot 10^{-5}$$

$$1 \quad \rho = \frac{350 \cdot 10^{-5} + 1371,38 \cdot 10^{-5}}{16} = 107,59 \cdot 10^{-5}$$

$$\frac{12 \times 306}{10 \cdot 107,59 \cdot 10^{-5}} 10 \cdot 350 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 200 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 59,8 \cdot 10^{-5} - 4 \cdot 0,5 \cdot 4780$$

$$= 0$$

Составим уравнение моментов относительно точки О:

$$M_{ult} = \frac{12 \times 306}{10 \cdot (107,59 \cdot 10^{-5})^2} 5 \cdot (350 \cdot 10^{-5})^2 - (200 \cdot 10^{-5})^2 - 2$$

$$\cdot (59,8 \cdot 10^{-5})^2 + 2 \cdot 0,5 \cdot 4780 \cdot 16,0 - 1,96 + 2 \cdot 0,5 \cdot 4780$$

$$\cdot 2 - 1,96 = 85236,3 = 8,52 \text{ кН} \cdot \text{м}$$

б) Арматура в сечении: нижняя – $\varnothing 10 \text{ мм}$, верхняя $\varnothing 10 \text{ мм}$

$$A_s = 0,785 \text{ см}^2;$$

$$\sigma_s = 5220 \text{ кг/см}^2$$

Проверка условия равновесия:

$$\frac{12 \times 306}{10 \cdot 178,13 \cdot 10^{-5}} 10 \cdot 350 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 200 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 59,8 \cdot 10^{-5} - 4 \cdot 0,785$$

$$\cdot 5220 = -10616,6 \neq 0$$

Левая часть уравнения < 0 , что свидетельствует о перееармировании.

Приближение 1:

$$\Delta \varepsilon_s = 0,1 \times 2500 \cdot 10^{-5} = 250 \cdot 10^{-5}$$

$$\varepsilon_s = 2500 \cdot 10^{-5} - 250 \cdot 10^{-5} = 2250 \cdot 10^{-5}$$

$$1 \quad \rho = \frac{350 \cdot 10^{-5} + 2250 \cdot 10^{-5}}{16} = 162,5$$

$$\frac{12 \times 306}{10 \cdot 162,5 \cdot 10^{-5}} \quad 10 \cdot 350 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 200 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 59,8 \cdot 10^{-5} - 4 \cdot 0,785 \\ \cdot 5220 = -10061,4 \neq 0$$

Приближение 2:

$$\varepsilon_s = 2250 \cdot 10^{-5} - 250 \cdot 10^{-5} = 2000 \cdot 10^{-5}$$

$$1 \quad \rho = \frac{315 \cdot 10^{-5} + 2000 \cdot 10^{-5}}{16} = 146,88$$

$$\frac{12 \times 306}{10 \cdot 146,88 \cdot 10^{-5}} \quad 10 \cdot 350 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 200 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 59,8 \cdot 10^{-5} - 4 \cdot 0,785 \\ \cdot 5220 = -9388,06 \neq 0$$

Приближение 3:

$$\varepsilon_s = 2000 \cdot 10^{-5} - 250 \cdot 10^{-5} = 1750 \cdot 10^{-5}$$

$$1 \quad \rho = \frac{350 \cdot 10^{-5} + 1750 \cdot 10^{-5}}{16} = 131,25$$

$$\frac{12 \times 306}{10 \cdot 178,13 \cdot 10^{-5}} \quad 10 \cdot 350 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 200 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 59,8 \cdot 10^{-5} - 4 \cdot 0,785 \\ \cdot 5220 = -8554,4 \neq 0$$

Приближение 4:

$$\varepsilon_s = 1750 \cdot 10^{-5} - 250 \cdot 10^{-5} = 1500 \cdot 10^{-5}$$

$$1 \quad \rho = \frac{350 \cdot 10^{-5} + 1500 \cdot 10^{-5}}{16} = 115,63$$

$$\frac{12 \times 306}{10 \cdot 115,63 \cdot 10^{-5}} \quad 10 \cdot 350 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 200 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 59,8 \cdot 10^{-5} - 4 \cdot 0,785 \\ \cdot 5220 = -7495,43 \neq 0$$

Приближение 5:

$$\varepsilon_s = 1500 \cdot 10^{-5} - 250 \cdot 10^{-5} = 1250 \cdot 10^{-5}$$

$$1 \quad \rho = \frac{350 \cdot 10^{-5} + 1250 \cdot 10^{-5}}{16} = 100$$

$$\frac{12 \times 306}{10 \cdot 100 \cdot 10^{-5}} \quad 10 \cdot 350 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 200 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 59,8 \cdot 10^{-5} - 4 \cdot 0,785 \cdot 5220 \\ = -6105,53 \neq 0$$

Приближение 6:

$$\varepsilon_s = 1250 \cdot 10^{-5} - 250 \cdot 10^{-5} = 1000 \cdot 10^{-5}$$

$$1 \quad \rho = \frac{350 \cdot 10^{-5} + 1000 \cdot 10^{-5}}{16} = 84,38$$

$$\frac{12 \times 306}{10 \cdot 84,38 \cdot 10^{-5}} \quad 10 \cdot 350 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 200 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 59,8 \cdot 10^{-5} - 4 \cdot 0,785 \\ \cdot 5220 = -4200,85 \neq 0$$

Приближение 7:

$$\varepsilon_s = 1000 \cdot 10^{-5} - 250 \cdot 10^{-5} = 750 \cdot 10^{-5}$$

$$1 \quad \rho = \frac{350 \cdot 10^{-5} + 750 \cdot 10^{-5}}{16} = 68,75$$

$$\frac{12 \times 306}{10 \cdot 68,75 \cdot 10^{-5}} \quad 10 \cdot 350 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 200 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 59,8 \cdot 10^{-5} - 4 \cdot 0,785 \\ \cdot 5220 = -1430,4 \neq 0$$

Приближение 8:

$$\varepsilon_s = 750 \cdot 10^{-5} - 250 \cdot 10^{-5} = 500 \cdot 10^{-5}$$

$$1 \quad \rho = \frac{350 \cdot 10^{-5} + 500 \cdot 10^{-5}}{16} = 53,125$$

$$\frac{12 \times 306}{10 \cdot 53,125 \cdot 10^{-5}} \quad 10 \cdot 350 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 200 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 59,8 \cdot 10^{-5} - 4 \cdot 0,785 \\ \cdot 5220 = 2969,71 \neq 0$$

Знак изменился, уточняем коэффициент:

$$\text{Принимаем } \varepsilon_s = 654 \cdot 10^{-5}$$

$$\rho = \frac{350 \cdot 10^{-5} + 654 \cdot 10^{-5}}{16} = 62,75 \cdot 10^{-5}$$

$$\frac{12 \times 306}{10 \cdot 62,75 \cdot 10^{-5}} 10 \cdot 350 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 200 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 59,8 \cdot 10^{-5} - 4 \cdot 0,785 \cdot 5220 = 0$$

Составим уравнение моментов относительно точки О:

$$M_{ult} = \frac{12 \times 306}{10 \cdot (62,75 \cdot 10^{-5})^2} 5 \cdot (350 \cdot 10^{-5})^2 - (200 \cdot 10^{-5})^2 - 2 \cdot (59,8 \cdot 10^{-5})^2 + 2 \cdot 0,785 \cdot 5220 \cdot 16,0 - 1,96 + 2 \cdot 0,785 \cdot 5220 \cdot 2 - 1,96 = 165113,1 = 16,51 \text{ кН} \cdot \text{м}$$

в) Арматура в сечении: нижняя – $\varnothing 12 \text{ мм}$, верхняя $\varnothing 12 \text{ мм}$

$$A_s = 1,13 \text{ см}^2;$$

$$\sigma_s = 5020 \text{ кг/см}^2$$

Проверка условия равновесия:

$$\frac{12 \times 306}{10 \cdot 178,13 \cdot 10^{-5}} 10 \cdot 350 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 200 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 59,8 \cdot 10^{-5} - 4 \cdot 1,13 \cdot 5020 = -16916,2 \neq 0$$

Левая часть уравнения < 0 , что свидетельствует о переармировании.

Приближение 1:

$$\Delta \varepsilon_s = 0,1 \times 2500 \cdot 10^{-5} = 250 \cdot 10^{-5}$$

$$\varepsilon_s = 2500 \cdot 10^{-5} - 250 \cdot 10^{-5} = 2250 \cdot 10^{-5}$$

$$\rho = \frac{350 \cdot 10^{-5} + 2250 \cdot 10^{-5}}{16} = 162,5$$

$$\frac{12 \times 306}{10 \cdot 162,5 \cdot 10^{-5}} 10 \cdot 350 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 200 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 59,8 \cdot 10^{-5} - 4 \cdot 1,13 \cdot 5020 = -16361,0 \neq 0$$

Приближение 2:

$$\varepsilon_s = 2250 \cdot 10^{-5} - 250 \cdot 10^{-5} = 2000 \cdot 10^{-5}$$

$$1 \quad \rho = \frac{315 \cdot 10^{-5} + 2000 \cdot 10^{-5}}{16} = 146,88$$

$$\frac{12 \times 306}{10 \cdot 146,88 \cdot 10^{-5}} \quad 10 \cdot 350 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 200 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 59,8 \cdot 10^{-5} - 4 \cdot 1,13 \\ \cdot 5020 = -15687,7 \neq 0$$

Приближение 3:

$$\varepsilon_s = 2000 \cdot 10^{-5} - 250 \cdot 10^{-5} = 1750 \cdot 10^{-5}$$

$$1 \quad \rho = \frac{350 \cdot 10^{-5} + 1750 \cdot 10^{-5}}{16} = 131,25$$

$$\frac{12 \times 306}{10 \cdot 178,13 \cdot 10^{-5}} \quad 10 \cdot 350 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 200 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 59,8 \cdot 10^{-5} - 4 \cdot 1,13 \\ \cdot 5020 = -14854,0 \neq 0$$

Приближение 4:

$$\varepsilon_s = 1750 \cdot 10^{-5} - 250 \cdot 10^{-5} = 1500 \cdot 10^{-5}$$

$$1 \quad \rho = \frac{350 \cdot 10^{-5} + 1500 \cdot 10^{-5}}{16} = 115,63$$

$$\frac{12 \times 306}{10 \cdot 115,63 \cdot 10^{-5}} \quad 10 \cdot 350 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 200 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 59,8 \cdot 10^{-5} - 4 \cdot 1,13 \\ \cdot 5020 = -13795,0 \neq 0$$

Приближение 5:

$$\varepsilon_s = 1500 \cdot 10^{-5} - 250 \cdot 10^{-5} = 1250 \cdot 10^{-5}$$

$$1 \quad \rho = \frac{350 \cdot 10^{-5} + 1250 \cdot 10^{-5}}{16} = 100$$

$$\frac{12 \times 306}{10 \cdot 100 \cdot 10^{-5}} \quad 10 \cdot 350 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 200 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 59,8 \cdot 10^{-5} - 4 \cdot 1,13 \cdot 5020 \\ = -12405,1 \neq 0$$

Приближение 6:

$$\varepsilon_s = 1250 \cdot 10^{-5} - 250 \cdot 10^{-5} = 1000 \cdot 10^{-5}$$

$$1 \quad \rho = \frac{350 \cdot 10^{-5} + 1000 \cdot 10^{-5}}{16} = 84,38$$

$$\frac{12 \times 306}{10 \cdot 84,38 \cdot 10^{-5}} 10 \cdot 350 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 200 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 59,8 \cdot 10^{-5} - 4 \cdot 1,13 \cdot 5020$$

$$= -10500,4 \neq 0$$

Приближение 7:

$$\varepsilon_s = 1000 \cdot 10^{-5} - 250 \cdot 10^{-5} = 750 \cdot 10^{-5}$$

$$1 \quad \rho = \frac{350 \cdot 10^{-5} + 750 \cdot 10^{-5}}{16} = 68,75$$

$$\frac{12 \times 306}{10 \cdot 68,75 \cdot 10^{-5}} 10 \cdot 350 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 200 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 59,8 \cdot 10^{-5} - 4 \cdot 1,13 \cdot 5020$$

$$= -7730,0 \neq 0$$

Приближение 8:

$$\varepsilon_s = 750 \cdot 10^{-5} - 250 \cdot 10^{-5} = 500 \cdot 10^{-5}$$

$$1 \quad \rho = \frac{350 \cdot 10^{-5} + 500 \cdot 10^{-5}}{16} = 53,125$$

$$\frac{12 \times 306}{10 \cdot 53,125 \cdot 10^{-5}} 10 \cdot 350 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 200 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 59,8 \cdot 10^{-5} - 4 \cdot 1,13$$

$$\cdot 5020 = -3329,89 \neq 0$$

Приближение 9:

$$\varepsilon_s = 500 \cdot 10^{-5} - 250 \cdot 10^{-5} = 250 \cdot 10^{-5}$$

$$1 \quad \rho = \frac{350 \cdot 10^{-5} + 250 \cdot 10^{-5}}{16} = 37,5$$

$$\frac{12 \times 306}{10 \cdot 37,5 \cdot 10^{-5}} 10 \cdot 350 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 200 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 59,8 \cdot 10^{-5} - 4 \cdot 1,13 \cdot 5020$$

$$= 4736,99 \neq 0$$

Знак изменился, уточняем коэффициент:

$$\text{Принимаем } \varepsilon_s = 375,26 \cdot 10^{-5}$$

$$1 \quad \rho = \frac{350 \cdot 10^{-5} + 375,26 \cdot 10^{-5}}{16} = 45,33 \cdot 10^{-5}$$

$$\frac{12 \times 306}{10 \cdot 45,33 \cdot 10^{-5}} 10 \cdot 350 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 200 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 59,8 \cdot 10^{-5} - 4 \cdot 1,13 \cdot 5020 = 0$$

Составим уравнение моментов относительно точки О:

$$M_{ult} = \frac{12 \times 306}{10 \cdot (45,33 \cdot 10^{-5})^2} 5 \cdot (350 \cdot 10^{-5})^2 - (200 \cdot 10^{-5})^2 - 2 \cdot (59,8 \cdot 10^{-5})^2 + 2 \cdot 1,13 \cdot 5020 \cdot 16,0 - 1,96 + 2 \cdot 1,13 \cdot 5020 \cdot 2 - 1,96 = 200769,6 = 20,08 \text{ кН} \cdot \text{м}$$

Сравним результаты, полученные по расчету с опытными данными (табл. 6):

Таблица 6 - Сравнение опытных и расчетных данных

Данные	М _р , кНм (Б-1)	М _р , кНм (Б-2)	М _р , кНм (Б-3)	М _р , кНм (К-8)	М _р , кНм (К-10)	М _р , кНм (К-12)
1	2	3	4	5	6	7
Расчет	8,23	6,58	19,33	8,52	16,51	20,08
Опыт	7,33	7,23	17,3	7,5	12,1	17,1

Опытные данные М_р (взяты из эксперимента Тошина Д.С.), указанные во 2-4 столбцах, взяты для сечений с:

- верхней арматурой $\varnothing 8$ мм и нижней арматурой $\varnothing 8$ мм;
- нижней арматурой $\varnothing 8$ мм;
- верхней арматурой 8 мм и нижней арматурой 12 мм.

Опытные данные М_р (взяты из эксперимента Ерышева В.А.), указанные в 5-7 столбцах, взяты для сечений с:

- верхней и нижней арматурой $\varnothing 8$ мм;
- верхней и нижней арматурой $\varnothing 10$ мм;
- верхней и нижней арматурой $\varnothing 12$ мм.

В соответствии с расчетами прочности железобетонного элемента по двухлинейной и трехлинейной диаграммам, составим сравнительную таблицу данных для одинаковых расчетных сечений (табл. 7).

Таблица 7 - Сравнение расчетов по двухлинейной и трехлинейной диаграммам

Данные	М _р , кНм (Б-1)	М _р , кНм (Б-2)	М _р , кНм (Б-3)	М _р , кНм (К-8)	М _р , кНм (К-10)	М _р , кНм (К-12)
1	2	3	4	5	6	7
Двухлинейная	8,18	6,62	19,07	8,38	16,38	19,2
Трехлинейная	8,23	6,58	19,33	8,52	16,51	20,08

Выводы по 4 главе

В данной главе рассмотрены сечения железобетонных элементов (балок) и сделаны сравнения с опытными данными, а также сравнения между расчетами по двухлинейной и трехлинейной диаграммам.

Из сравнения опытных и расчетных данных видно, что расчетные данные близки по значениям с опытными, но есть процент расхождения.

Из сравнения между расчетами по двухлинейной и трехлинейной диаграммам видно, что значения имеют минимальные расхождения друг с другом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен обзор вариантов представления диаграмм деформирования арматуры и бетона, отражающие физические зависимости « σ_b - ϵ_b ». Наиболее точно характеризующими связь между напряжениями и деформациями являются линейные зависимости. На основании данных зависимостей выполнен расчет железобетонного сечения.

После расчета железобетонного сечения проведен сравнительный анализ, в соответствии с которым мы видим, что между опытными и расчетными данными есть процент расхождения, но они близки друг к другу, а значения, рассчитанные по двухлинейной и трехлинейной диаграммам имеют самые минимальные расхождения.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Частично содержание диссертации изложено в следующих публикациях:
в изданиях, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий ВАК:

1. Малинова Е.М. Исследование диаграмм деформирования арматуры для расчета железобетонных элементов // Сборник статей Международной научно-практической конференции «Инструменты и механизмы современного инновационного развития». – 2016. – С. 40-42.
2. Малинова Е.М. Диаграммы деформирования арматуры для расчета железобетонных элементов // Символ науки. – 2016. – №3. – С. 61-63.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Берг, О.Я. Высокопрочный бетон / О.Я. Берг, Е.Н. Щербаков, Г.Н. Писанко. – М. : Стройиздат, 1971. – 208 с.

2 Бондаренко, В.М. Расчетные модели силового сопротивления железобетона / В.М. Бондаренко, В.И. Колчунов, Монография. – М. : Издательство АСВ, 2004. – 472 с.

3 Карпенко, Н.И. Общие модели механики железобетона. – М. : Стройиздат, 1996. – 416 с: ил. – ISBN 5-274-01682-024.

4 Крылов, С.М. Особенности деформирования изгибаемых железобетонных элементов при разгрузке и повторных нагружениях / С.М. Крылов, В.В. Чижевский, С.Б. Стародубская // Исследования железобетонных конструкций при статических, повторных и динамических воздействиях. – М. : НИИЖБ, 1984. – С. 78 – 82.

5 Лившиц, Я.Д. Расчет железобетонных конструкций с учетом влияния усадки и ползучести бетона / Я.Д. Лившиц // Вища школа, Киев, 1976. – 278 с.

6 Матаров, И.А. Работа изгибаемых железобетонных конструкций под повторными нагрузками / И.А. Матаров // Теория расчета и конструирования железобетонных конструкций. – М. : 1958. – С. 85 – 107.

7 Мурашев, В.И. Трещиноустойчивость, жесткость и прочность железобетона / В.И. Мурашев. – М. : Машстройиздат, 1950.

8 Попов, Н.Н. Динамический расчет железобетонных конструкций / Н.Н. Попов, Б.С. Расторгуев – М. : Стройиздат, 1974.

9 СНБ 5.03.01-02 Бетонные и железобетонные конструкции. – Строительные нормы Республики Беларусь. – Минск. – 2003.

10 СП 63.13330.2012 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003. - ОАО НИЦ Строительство. НИИЖБ им. А.А. Гвоздева, 2012.

11 Бабич, Е.М. Экспериментальное исследование модуля упругости бетонных образцов при различной интенсивности сжимающих

нагрузок / Е.М. Бабич, Л.П. Макаренко // Известия вузов. Строительство и архитектура. – 1967. – № 3. – С. 20–27.

12 Берг, О.Я. Некоторые вопросы теории деформаций и прочности бетона / О. Я. Берг // Строительство и архитектура, – 1967. – № 10.

13 Карпенко, Н.И. Исходные и трансформированные диаграммы деформирования бетона и арматуры [Текст] / Н.И. Карпенко, Т.А. Мухамедиев, А.Н. Петров // Напряженно-деформированное состояние бетонных и железобетонных конструкций: сб. статей / НИИЖБ. – 1987. – С.4 - 24.

14 Гвоздев, А.А. Об уточнении теории линейной ползучести бетона / А.А. Гвоздев, К.З. Галустов, А.В. Яшин // Механика твёрдого тела. – 1966. – № 6.

15 Гордеева, Т.Ф. Исследование работы железобетонных балок при повторных нагрузках / Т.Ф. Гордеева // Бетон и железобетон. – 1970. – № 1. – С. 36–38.

16 Доценко, А.В. Результаты экспериментальных исследований работы железобетонных балок – стенок при переменных нагрузках / А.В. Доценко, М.Д. Сирота // Совершенствование методов расчета и повышение надежности железобетонных конструкций. Ростов на Дону, 1984. – С. 51–56.

17 Кузовчикова, Е.А. Исследование влияния малоцикловых сжимающих воздействий на деформативности, прочность и структурные изменения бетона / Е.А. Кузовчикова, А.В. Яшин // Известия вузов. Строительство и архитектура. – 1976. – № 10. – С. 30 – 35.

18 Курылло, А.С. Исследование прогибов изгибаемых железобетонных элементов при многократно повторяющихся нагрузках / А.С. Курылло, В.Г. Кваша, В.В. Леввич // Вопросы современного строительства. – Львов, 1973. – Вып. 80. – С. 3 –10.

19 Маркин, А.П. Кинетика разрушения бетона при циклических нагружениях / А.П. Маркин, Г.А. Фокин // Известия вузов. Строительство и архитектура. – 1982. – № 1. – С. 75 – 77.

20 Маилян, Л.Р. Работа бетона и арматуры при многократно повторных нагружениях / Л.Р. Маилян, М.Ю. Беккиев, Г.Р., Силь Г.Р. – Нальчик: Кабардино – Балкарский агромилиоративный институт. – 1984 г. – 55 с.

21 Меркин, А.П. Кинетика разрушения бетона при циклических нагружениях / А.П. Меркин, Г.А. Фокин // Известия вузов. Строительство и архитектура. – 1982. – № 1. – С. 75 – 77.

22 Мурашкин, Г.В. Применение диаграмм деформирования для расчета несущей способности внецентренно сжатых железобетонных элементов / Г.В. Мурашкин, С.С. Мордовский // Жилищное строительство. Москва, 2013. – № 3. – С. 38 – 40.

23 Погореляк, А.Б. Прочность железобетонных балок по наклонным сечениям при воздействии многократно повторных нагрузок / А.Б. Погореляк, Е.М. Бабич // Известия вузов. Строительство и архитектура. – 1980. – № 3. – С. 14 – 16.

24 Ерышев, В.А. Метод расчета деформаций железобетонных стержневых и плитных конструкций при повторных, знакопеременных и других видах сложного нагружения : дис. д-ра техн. наук / В.А. Ерышев. – М. : Москва, 1997. – 353 с.

25 Котов, В.А. Влияние вида напряженного состояния на способность бетона сопротивляться разрушению в конструкциях, подвергаемых повторно-переменному нагружению : дис. ... канд. техн. наук / В.А. Котов. – М. : 1983. – 232 с.

26 Крамарчук, П.П. Исследования деформативности бетона и изгибаемых железобетонных элементов под действием длительных повторных нагрузок : дисс. ... канд. техн. наук / П.П. Крамарчук. – М. : Изд-во Киев, 1971. – 24 с.

27 Кузнецов, А.В. Метод расчета стержневых железобетонных конструкций на повторные и знакопеременные нагрузки с учетом действия моментов и нормальных сил : автореф. дис. ... канд. техн. наук / А.В. Кузнецов. – 1992. – 25 с.

28 Куприянов, В.В. Расчет упругопластических рам на повторно-переменную и подвижную нагрузку : автореф. дис. ... канд. техн. наук / В.В. Куприянов. – 1972. – 20 с.

29 Матаров, И.А. Прочность и деформация железобетона при повторных нагрузках : автореф. дис. ... докт. техн. наук / И.А. Матаров. – 1961.

30 Нугужин, Ж.С. Деформации и ширина раскрытия трещин изгибаемых железобетонных элементов при многократно повторных нагружениях : дис. ... канд. техн. наук : – М. : 1986. – 198 с.

31 Селюков, В.М. Экспериментальная проверка и доработка существующих методов расчета изгибаемых железобетонных элементов на выносливость : автореф. дис. ... канд. техн. наук / В.М. Селюков. – М. : 1965.

32 Тошин, Д.С. Нелинейный расчет деформаций изгибаемых железобетонных элементов при разгрузке с применением деформационной модели : дис. ... канд. техн. наук / Д.С. Тошин. – Тольятти. – 2009. – 130 с.

33 Цепелев, С.В. Прочность и деформативность неразрезных железобетонных балок при многократно повторных нагрузках : дис. ... канд. техн. наук / С.В. Цепелев. – М. : – 1986. – 130 с.

34 Яковлев, С.К. Исследования приспособляемости железобетонных конструкций при действии повторных кратковременных нагрузок : дис. ... канд. техн. наук / С.К. Яковлев – М. : – 1984. – 181 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А



Рисунок А.1 - Испытание опытного образца №1



Рисунок А.2 - Результаты испытания опытного образца №1



Рисунок А.3 - Испытание опытного образца №2



Рисунок А.4 - Результаты испытания опытного образца №2



Рисунок А.5 - Результаты испытания опытного образца №2



Рисунок А.6 - Испытание опытного образца №3



Рисунок А.7 - Результаты испытания опытного образца №3



Рисунок А.8 - Результаты испытания опытного образца №3

ПРИЛОЖЕНИЕ Б
Арматура класса А240
 Параметры для расчета по СП 63.13330.2012 и СНБ 5.03.01-02

Es	200000				Es	200000		
σпред	240				σпред	210	182,6086957	
γс	1,2				γс	1,2		
ftk	259,2				ftk	226,8		
k	1,08				k	1,08		

Расчет по второй группе предельных состояний					Расчет по первой группе предельных состояний			
Двухлинейная		Трехлинейная			Двухлинейная		Трехлинейная	
σ	ε	σ	ε		σ	ε	σ	ε
0	0	0	0		0	0	0	0
240	0,0012	216	0,00108		182,6086957	0,000913043	164,3478261	0,000821739
240	0,025	240	0,0012		182,6086957	0,025	182,6086957	0,000913043
		264	0,00132				200,8695652	0,001004348
		264	0,015				200,8695652	0,015

Еврокод			
σ	ε	σ	ε
0	0	0	0
200	0,001	240	0,0012
200	0,025	240	0,025

Расчет криволинейных диаграмм через деформации и напряжения по второй группе
предельных состояний

$\varepsilon_{s,el}$	0,00102
$\varepsilon_{s0,2}$	0,0032
$\varepsilon_{спред}$	0,025
$\varepsilon\Delta s_{0,2}$	0,00218
$\varepsilon\Delta s_{спред}$	0,02398

$\sigma_{s,el}$	204
$\sigma_{s0,2}$	240
$\sigma_{спред}$	292,8
$\sigma\Delta s_{0,2}$	36
$\sigma\Delta s_{спред}$	88,8

$\nu\Delta s_{спред}$	0,01851543
E_s	200000
c	2
k	7
n	20
$\nu\Delta 0$	1
$\nu\Delta s_{0,2}$	0,082568807

ε_s	$\varepsilon\Delta s$	$\eta\Delta d$	$\nu\Delta s$	$\sigma\Delta s$	νs	σs
0,00102	0	0	0,28	0	1	204
0,0015	0,00048	0,020016681	0,206243089	19,79933655	0,745997789	223,7993366
0,002	0,00098	0,040867389	0,15331979	30,0506789	0,585126697	234,0506789
0,0025	0,00148	0,061718098	0,117193776	34,68935773	0,477378715	238,6893577
0,0032	0,00218	0,090909091	0,084961738	37,04331755	0,376630184	240
0,004	0,00298	0,124270225	0,06384929	38,05417675	0,302567721	242,0541767
0,005	0,00398	0,165971643	0,049814964	39,65271172	0,243652712	243,6527117
0,006	0,00498	0,207673061	0,042403061	42,23344874	0,205194541	246,2334487
0,007	0,00598	0,249374479	0,038049591	45,50731136	0,178219508	249,5073114
0,008	0,00698	0,291075897	0,035185606	49,11910666	0,158199442	253,1191067
0,009	0,00798	0,332777314	0,033112332	52,84728127	0,142692934	256,8472813
0,01	0,00898	0,374478732	0,031502127	56,57781958	0,13028891	260,5778196
0,011	0,00998	0,41618015	0,030185546	60,25034963	0,120113795	264,2503496
0,012	0,01098	0,457881568	0,029063568	63,82359441	0,111593164	267,8235944
0,013	0,01198	0,499582986	0,028072062	67,26066058	0,104331023	271,2606606
0,014	0,01298	0,541284404	0,02716704	70,52563541	0,09804487	274,5256354
0,015	0,01398	0,582985822	0,026317843	73,5846897	0,09252823	277,5846897

0,016	0,01498	0,624687239	0,025503351	76,40803814	0,087627512	280,4080381
0,017	0,01598	0,666388657	0,024709418	78,97130074	0,083226853	282,9713007
0,018	0,01698	0,708090075	0,023926955	81,25594026	0,079237761	285,2559403
0,019	0,01798	0,749791493	0,023150421	83,24891362	0,075591819	287,2489136
0,02	0,01898	0,791492911	0,022376662	84,94181012	0,072235453	288,9418101
0,021	0,01998	0,833194329	0,021604041	86,32974878	0,069126131	290,3297488
0,022	0,02098	0,874895746	0,020831806	87,41025913	0,066229604	291,4102591
0,023	0,02198	0,916597164	0,02005967	88,18230884	0,063517893	292,1823088
0,024	0,02298	0,958298582	0,019287549	88,6455761	0,060967828	292,6455761
0,025	0,02398	1	0,01851543	88,8	0,05856	292,8

σ_s	η	vs	ε_s
0			0
204	0	1	0,00102
210	0,067567568	0,896901666	0,001170697
220	0,18018018	0,719472108	0,001528899
230	0,292792793	0,528191832	0,002177239
240	0,405405405	0,291077693	0,0032
250	0,518018018	#ЧИСЛО!	#ЧИСЛО!
260	0,630630631	#ЧИСЛО!	#ЧИСЛО!
270	0,743243243	#ЧИСЛО!	#ЧИСЛО!
280	0,855855856	#ЧИСЛО!	#ЧИСЛО!
290	0,968468468	#ЧИСЛО!	#ЧИСЛО!
292,8	1	0,05856	0,025

Расчет криволинейных диаграмм через деформации и напряжения по первой группе
предельных состояний

$\varepsilon_{s,el}$	0,0008925
$\varepsilon_{s0,2}$	0,00305
$\varepsilon_{спред}$	0,025
$\varepsilon\Delta s_{0,2}$	0,0021575
$\varepsilon\Delta s_{спред}$	0,0241075

$\sigma_{s,el}$	178,5
$\sigma_{s0,2}$	210
$\sigma_{спред}$	256,2
$\sigma\Delta s_{0,2}$	31,5
$\sigma\Delta s_{спред}$	77,7

$v\Delta s_{спред}$	0,016115317
E_s	200000
c	2
k	7
n	20
$v\Delta 0$	1
$v\Delta s_{0,2}$	0,073001159

ε_s	$\varepsilon\Delta s$	$\eta\Delta d$	$v\Delta s$	$\sigma\Delta s$	v_s	σ_s
0,0008925	0	0	0,28	0	1	178,5
0,0015	0,0006075	0,025199627	0,188153607	22,8606633	0,671202211	201,3606633
0,002	0,0011075	0,04594006	0,138827154	30,75021455	0,523125536	209,2502146
0,00275	0,0018575	0,07705071	0,092735344	34,45118015	0,387183964	209,9511801
0,00305	0,0021575	0,08949497	0,080558805	34,7611244	0,349608401	210
0,0035	0,0026075	0,108161361	0,066790979	34,83149543	0,304759279	212,3314954
0,004	0,0031075	0,128901794	0,056062025	34,8425483	0,266678185	213,3425483
0,005	0,0041075	0,170382661	0,043344201	35,60726129	0,214107261	214,1072613
0,006	0,0051075	0,211863528	0,036747565	37,53763792	0,180031365	216,0376379
0,007	0,0061075	0,253344395	0,032942744	40,23956182	0,156242544	218,7395618
0,008	0,0071075	0,294825262	0,030473479	43,31805108	0,138636282	221,8180511
0,009	0,0081075	0,336306129	0,028698513	46,53463959	0,125019244	225,0346396
0,01	0,0091075	0,377786996	0,027322485	49,76790591	0,114133953	228,2679059
0,011	0,0101075	0,419267863	0,026196061	52,9553373	0,105206971	231,4553373
0,012	0,0111075	0,46074873	0,025233827	56,05694608	0,097732061	234,5569461
0,013	0,0121075	0,502229597	0,024381279	59,03926685	0,091361256	237,5392669
0,014	0,0131075	0,543710464	0,023601325	61,87087384	0,085846741	240,3708738

0,015	0,0141075	0,58519133	0,022868204	64,52263674	0,081007546	243,0226367
0,016	0,0151075	0,626672197	0,022164189	66,9690985	0,076709093	245,4690985
0,017	0,0161075	0,668153064	0,021477419	69,18950476	0,072849854	247,6895048
0,018	0,0171075	0,709633931	0,020800267	71,16811374	0,069352254	249,6681137
0,019	0,0181075	0,751114798	0,020128087	72,89386815	0,066156281	251,3938681
0,02	0,0191075	0,792595665	0,019458235	74,35964686	0,063214912	252,8596469
0,021	0,0201075	0,834076532	0,018789338	75,56132136	0,060490791	254,0613214
0,022	0,0211075	0,875557399	0,018120764	76,49680372	0,057953819	254,9968037
0,023	0,0221075	0,917038266	0,017452272	77,165222	0,055579396	255,665222
0,024	0,0231075	0,958519133	0,016783794	77,56630457	0,053347147	256,0663046
0,025	0,0241075	1	0,016115317	77,7	0,05124	256,2

σ_s	η	vs	ε_s
0			0
178,5	0	1	0,0008925
190	0,148005148	0,765801202	0,001240531
200	0,276705277	0,545455231	0,001833331
210	0,405405405	0,263931237	0,00305
220	0,534105534	#ЧИСЛО!	#ЧИСЛО!
230	0,662805663	#ЧИСЛО!	#ЧИСЛО!
240	0,791505792	#ЧИСЛО!	#ЧИСЛО!
250	0,92020592	#ЧИСЛО!	#ЧИСЛО!
256,2	1	0,05124	0,025

Арматура класса А400
 Параметры для расчета по СП 63.13330.2012 и СНБ 5.03.01-02

Es	200000				Es	200000	
σпред	400				σпред	350	304,3478261
γс	1,2				γс	1,2	
ftk	420				ftk	378	
k	1,05				k	1,08	

Двухлинейная		Трехлинейная			Двухлинейная		Трехлинейная	
σ	ε	σ	ε		σ	ε	σ	ε
0	0	0	0		0	0	0	0
400	0,002	360	0,0018		304,3478261	0,001521739	273,9130435	0,001369565
400	0,025	400	0,002		304,3478261	0,025	304,3478261	0,001521739
		440	0,0022				334,7826087	0,001673913
		440	0,015				334,7826087	0,015

Еврокод			
σ	ε	σ	ε
0	0	0	0
333,3333333	0,001666667	400	0,002
333,3333333	0,025	400	0,025

Расчет криволинейных диаграмм через деформации и напряжения по второй группе предельных состояний

$\varepsilon_{s,el}$	0,0017
$\varepsilon_{s0,2}$	0,004
$\varepsilon_{спред}$	0,025
$\varepsilon\Delta s_{0,2}$	0,0023
$\varepsilon\Delta s_{спред}$	0,0233

$\sigma_{s,el}$	340
$\sigma_{s0,2}$	400
$\sigma_{спред}$	488
$\sigma\Delta s_{0,2}$	60
$\sigma\Delta s_{спред}$	148

$v\Delta s_{спред}$	0,031759657
E_s	200000
c	2
k	7
n	20
$v\Delta 0$	1
$v\Delta s_{0,2}$	0,130434783

ε_s	$\varepsilon\Delta s$	$\eta\Delta d$	$v\Delta s$	$\sigma\Delta s$	v_s	σ_s
0	0	0	1	0	0	0
0,0017	0	0	0,48	0	1	340
0,002	0,0003	0,012875536	0,393495131	23,60970787	0,90902427	363,6097079
0,0025	0,0008	0,034334764	0,287659999	46,02559978	0,7720512	386,0255998
0,003	0,0013	0,055793991	0,216205635	56,21346514	0,660355775	396,2134651
0,0035	0,0018	0,077253219	0,167940279	60,45850053	0,572083572	398,4585005
0,004	0,0023	0,098712446	0,135227386	62,20459767	0,502755747	400
0,005	0,0033	0,141630901	0,097471711	64,33132938	0,404331329	404,3313294
0,006	0,0043	0,184549356	0,078853692	67,81417534	0,339845146	407,8141753
0,007	0,0053	0,227467811	0,06874921	72,87416211	0,294910116	412,8741621
0,008	0,0063	0,270386266	0,062568261	78,83600855	0,261772505	418,8360086
0,009	0,0073	0,313304721	0,058334292	85,16806617	0,236204481	425,1680662
0,01	0,0083	0,356223176	0,055169637	91,58159687	0,215790798	431,5815969
0,011	0,0093	0,399141631	0,052652009	97,93273658	0,199060335	437,9327366
0,012	0,0103	0,442060086	0,050551752	104,1366087	0,18505692	444,1366087
0,013	0,0113	0,484978541	0,048727666	110,1245256	0,173124818	450,1245256
0,014	0,0123	0,527896996	0,047085612	115,8306053	0,162796645	455,8306053
0,015	0,0133	0,570815451	0,045560805	121,1917407	0,15373058	461,1917407

0,016	0,0143	0,613733906	0,044108829	126,1512496	0,145672266	466,1512496
0,017	0,0153	0,656652361	0,042699991	130,6619722	0,138429992	470,6619722
0,018	0,0163	0,699570815	0,041315216	134,6876035	0,131857668	474,6876035
0,019	0,0173	0,74248927	0,039942879	138,2023597	0,125842726	478,2023597
0,02	0,0183	0,785407725	0,038576365	141,1894948	0,120297374	481,1894948
0,021	0,0193	0,82832618	0,037212237	143,6392363	0,115152199	483,6392363
0,022	0,0203	0,871244635	0,03584892	145,5466156	0,110351504	485,5466156
0,023	0,0213	0,91416309	0,03448581	146,909549	0,105849902	486,909549
0,024	0,0223	0,957081545	0,033122732	147,727385	0,101609872	487,727385
0,025	0,0233	1	0,031759657	148	0,0976	488

σ_S	η	vs	ϵ_S
0			0
340	0	1	0,0017
350	0,067567568	0,907438593	0,001928505
360	0,135135135	0,81338369	0,002212978
370	0,202702703	0,717155478	0,002579636
380	0,27027027	0,617548698	0,00307668
390	0,337837838	0,512134995	0,00380759
400	0,405405405	0,394798306	0,004065878
410	0,472972973	#ЧИСЛО!	#ЧИСЛО!
420	0,540540541	#ЧИСЛО!	#ЧИСЛО!
430	0,608108108	#ЧИСЛО!	#ЧИСЛО!
440	0,675675676	#ЧИСЛО!	#ЧИСЛО!
450	0,743243243	#ЧИСЛО!	#ЧИСЛО!
460	0,810810811	#ЧИСЛО!	#ЧИСЛО!
470	0,878378378	#ЧИСЛО!	#ЧИСЛО!
480	0,945945946	#ЧИСЛО!	#ЧИСЛО!
488	1	0,0976	0,025

Расчет криволинейных диаграмм через деформации и напряжения по первой группе предельных состояний

$\varepsilon_{s,el}$	0,0014875
$\varepsilon_{s0,2}$	0,00375
$\varepsilon_{спред}$	0,025
$\varepsilon\Delta s_{0,2}$	0,0022625
$\varepsilon\Delta s_{спред}$	0,0235125

$\sigma_{s,el}$	297,5
$\sigma_{s0,2}$	350
$\sigma_{спред}$	427
$\sigma\Delta s_{0,2}$	52,5
$\sigma\Delta s_{спред}$	129,5

$\nu\Delta s_{спред}$	0,027538543
E_s	200000
c	2
k	7
n	20
$\nu\Delta 0$	1
$\nu\Delta s_{0,2}$	0,116022099

ε_s	$\varepsilon\Delta s$	$\eta\Delta d$	$\nu\Delta s$	$\sigma\Delta s$	νs	σs
0	0	0	1	0	0	0
0,0014875	0	0	0,48	0	1	297,5
0,002	0,0005125	0,021796917	0,339693651	34,81859924	0,830796498	332,3185992
0,0025	0,0010125	0,043062201	0,247717358	50,16276504	0,69532553	347,662765
0,003	0,0015125	0,064327485	0,185722525	56,18106392	0,58946844	349,6810639
0,00375	0,0022625	0,096225412	0,128443919	58,12087352	0,474161165	350,0208735
0,004	0,0025125	0,106858054	0,115690192	58,13432156	0,444542902	353,6343216
0,005	0,0035125	0,149388623	0,083251364	58,48408334	0,355984083	355,9840833
0,006	0,0045125	0,191919192	0,067397632	60,82636268	0,298605302	358,3263627
0,007	0,0055125	0,234449761	0,05887637	64,91119788	0,258865141	362,4111979
0,008	0,0065125	0,27698033	0,053701934	69,94676842	0,22965423	367,4467684
0,009	0,0075125	0,319510898	0,050167398	75,37651478	0,207153619	372,8765148
0,01	0,0085125	0,362041467	0,047521854	80,90595621	0,189202978	378,4059562
0,011	0,0095125	0,404572036	0,045408788	86,39021867	0,174495554	383,8902187
0,012	0,0105125	0,447102605	0,043637095	91,74699203	0,162186247	389,246992
0,013	0,0115125	0,489633174	0,042090596	96,91359635	0,151697537	394,4135964
0,014	0,0125125	0,532163743	0,04069233	101,832556	0,14261877	399,332556
0,015	0,0135125	0,574694312	0,039389493	106,4501058	0,134650035	403,9501058

0,016	0,0145125	0,61722488	0,038145924	110,7185441	0,127568295	408,2185441
0,017	0,0155125	0,659755449	0,036937457	114,5984606	0,12120543	412,0984606
0,018	0,0165125	0,702286018	0,03574857	118,0596527	0,115433237	415,5596527
0,019	0,0175125	0,744816587	0,034569804	121,0807377	0,110152826	418,5807377
0,02	0,0185125	0,787347156	0,033395776	123,6478606	0,105286965	421,1478606
0,021	0,0195125	0,829877725	0,03222369	125,7529507	0,100774512	423,2529507
0,022	0,0205125	0,872408293	0,031052263	127,3919105	0,096566343	424,8919105
0,023	0,0215125	0,914938862	0,029881005	128,5630237	0,092622396	426,0630237
0,024	0,0225125	0,957469431	0,028709773	129,2657541	0,088909532	426,7657541
0,025	0,0235125	1	0,027538543	129,5	0,0854	427

σ_s	η	vs	ε_s
0			0
297,5	0	1	0,0014875
300	0,019305019	0,972852129	0,001541858
310	0,096525097	0,863080308	0,001795893
320	0,173745174	0,750716978	0,002131296
330	0,250965251	0,634172575	0,002601815
340	0,328185328	0,510018221	0,003333214
350	0,405405405	0,368409835	0,003750145
360	0,482625483	#ЧИСЛО!	#ЧИСЛО!
370	0,55984556	#ЧИСЛО!	#ЧИСЛО!
380	0,637065637	#ЧИСЛО!	#ЧИСЛО!
390	0,714285714	#ЧИСЛО!	#ЧИСЛО!
400	0,791505792	#ЧИСЛО!	#ЧИСЛО!
410	0,868725869	#ЧИСЛО!	#ЧИСЛО!
420	0,945945946	#ЧИСЛО!	#ЧИСЛО!
427	1	0,0854	0,025

Арматура класса А600

Параметры для расчета по СП 63.13330.2012 и СНБ 5.03.01-02

Es	200000				Es	200000	
σ _{пред}	600				σ _{пред}	520	452,173913
γ _c	1,2				γ _c	1,2	
ftk	660				ftk	561,6	
k	1,1				k	1,08	

Двухлинейная		Трехлинейная			Двухлинейная		Трехлинейная	
σ	ε	σ	ε		σ	ε	σ	ε
0	0	0	0		0	0	0	0
600	0,003	540	0,0027		452,173913	0,00226087	406,9565217	0,002034783
600	0,025	600	0,005		452,173913	0,025	452,173913	0,00426087
		660	0,0073				497,3913043	0,006486957
		660	0,015				497,3913043	0,015

Еврокод			
σ	ε	σ	ε
0	0	0	0
500	0,0025	600	0,003
550	0,025	660	0,025

Расчет криволинейных диаграмм через деформации и напряжения по второй группе предельных состояний

$\varepsilon_{s,el}$	0,00255
$\varepsilon_{s0,2}$	0,005
$\varepsilon_{спред}$	0,025
$\varepsilon\Delta s_{0,2}$	0,00245
$\varepsilon\Delta s_{спред}$	0,02245

$\sigma_{s,el}$	510
$\sigma_{s0,2}$	600
$\sigma_{спред}$	732
$\sigma\Delta s_{0,2}$	90
$\sigma\Delta s_{спред}$	222

$v\Delta s_{спред}$	0,049443207
E_s	200000
c	2
k	7
n	20
$v\Delta 0$	1
$v\Delta s_{0,2}$	0,183673469

ε_s	$\varepsilon\Delta s$	$\eta\Delta d$	$v\Delta s$	$\sigma\Delta s$	v_s	σ_s
0,00255	0	0	0,7	0	1	510
0,003	0,00045	0,020044543	0,518700058	46,68300523	0,927805009	556,6830052
0,0035	0,00095	0,042316258	0,381371787	72,46063953	0,832086628	582,4606395
0,004	0,00145	0,064587973	0,289776671	84,03523447	0,742544043	594,0352345
0,0045	0,00195	0,086859688	0,228532242	89,12757445	0,665697305	599,1275744
0,005	0,00245	0,109131403	0,187322637	91,78809237	0,601788092	600,0880924
0,0055	0,00295	0,131403118	0,159285639	93,97852702	0,549071388	603,978527
0,006	0,00345	0,153674833	0,139892233	96,52564045	0,505438034	606,5256404
0,007	0,00445	0,198218263	0,116203064	103,4207272	0,438157662	613,4207272
0,008	0,00545	0,242761693	0,102931196	112,1950036	0,388871877	622,1950036
0,009	0,00645	0,287305122	0,094490744	121,8930597	0,3510517	631,8930597
0,01	0,00745	0,331848552	0,088515089	131,8874827	0,320943741	641,8874827
0,011	0,00845	0,376391982	0,083942876	141,8634604	0,296301573	651,8634604
0,012	0,00945	0,420935412	0,080241908	151,6572067	0,275690503	661,6572067
0,013	0,01045	0,465478842	0,077106263	161,1520901	0,258135419	671,1520901
0,014	0,01145	0,510022272	0,074340054	170,2387237	0,242942401	680,2387237

0,015	0,01245	0,554565702	0,071811005	178,8094035	0,229603134	688,8094035
0,016	0,01345	0,599109131	0,069429101	186,7642829	0,217738838	696,7642829
0,017	0,01445	0,643652561	0,067134321	194,0181863	0,207064172	704,0181863
0,018	0,01545	0,688195991	0,064888131	200,504326	0,197362313	710,504326
0,019	0,01645	0,732739421	0,062667059	206,1746225	0,188467006	716,1746225
0,02	0,01745	0,777282851	0,060457745	210,9975306	0,180249383	720,9975306
0,021	0,01845	0,821826281	0,058253251	214,9544959	0,172608213	724,9544959
0,022	0,01945	0,86636971	0,056050392	218,0360266	0,165462733	728,0360266
0,023	0,02045	0,91091314	0,053847952	220,238122	0,158747418	730,238122
0,024	0,02145	0,95545657	0,051645577	221,5595261	0,152408235	731,5595261
0,025	0,02245	1	0,049443207	222	0,1464	732

σ_s	η	vs	ε_s
0			0
510	0	1	0,00255
525	0,067567568	0,916237706	0,002864977
540	0,135135135	0,83141082	0,003247492
555	0,202702703	0,745066976	0,003724497
570	0,27027027	0,65643634	0,004341624
585	0,337837838	0,564065637	0,0047185567
600	0,405405405	0,464715403	0,00500003
615	0,472972973	#ЧИСЛО!	#ЧИСЛО!
645	0,608108108	#ЧИСЛО!	#ЧИСЛО!
675	0,743243243	#ЧИСЛО!	#ЧИСЛО!
705	0,878378378	#ЧИСЛО!	#ЧИСЛО!
720	0,945945946	#ЧИСЛО!	#ЧИСЛО!
732	1	0,1464	0,025

Расчет криволинейных диаграмм через деформации и напряжения по первой группе предельных состояний

$\varepsilon_{s,el}$	0,00221
$\varepsilon_{s0,2}$	0,0046
$\varepsilon_{спред}$	0,025
$\varepsilon\Delta s_{0,2}$	0,00239
$\varepsilon\Delta s_{спред}$	0,02279

$\sigma_{s,el}$	442
$\sigma_{s0,2}$	520
$\sigma_{спред}$	634,4
$\sigma\Delta s_{0,2}$	78
$\sigma\Delta s_{спред}$	192,4

$v\Delta s_{спред}$	0,042211496
E_s	200000
c	2
k	7
n	20
$v\Delta 0$	1
$v\Delta s_{0,2}$	0,163179916

ε_s	$\varepsilon\Delta s$	$\eta\Delta d$	$v\Delta s$	$\sigma\Delta s$	v_s	σ_s
0,00221	0	0	0,7	0	1	442
0,0025	0,00029	0,012724879	0,572204884	33,18788329	0,950375767	475,1878833
0,003	0,00079	0,034664326	0,411202446	64,96998647	0,844949977	506,9699865
0,0035	0,00129	0,056603774	0,303796107	78,37939557	0,743399137	514,3793956
0,004	0,00179	0,078543221	0,232174609	83,11850999	0,656398137	518,11851
0,0045	0,00229	0,100482668	0,184296188	84,4076543	0,584897394	519,9076543
0,005	0,00279	0,122422115	0,152085978	84,8639758	0,526863976	526,8639758
0,0055	0,00329	0,144361562	0,130173083	85,65388872	0,479685353	527,6538887
0,006	0,00379	0,166301009	0,115013292	87,18007554	0,440983396	529,1800755
0,007	0,00479	0,210179903	0,096477735	92,42567018	0,381732622	534,4256702
0,008	0,00579	0,254058798	0,086059037	99,65636533	0,338535228	541,6563653
0,009	0,00679	0,297937692	0,079393355	107,8161758	0,305453431	549,8161758
0,01	0,00779	0,341816586	0,074635451	116,2820321	0,279141016	558,2820321
0,011	0,00879	0,38569548	0,070960381	124,7483505	0,257612887	566,7483505
0,012	0,00979	0,429574375	0,067956111	133,0580647	0,239607527	575,0580647
0,013	0,01079	0,473453269	0,065386616	141,1043177	0,224270891	583,1043177
0,014	0,01179	0,517332163	0,063101106	148,7924074	0,210997288	590,7924074

0,015	0,01279	0,561211057	0,060997865	156,0325376	0,199344179	598,0325376
0,016	0,01379	0,605089952	0,059007703	162,7432458	0,188982264	604,7432458
0,017	0,01479	0,648968846	0,057084494	168,855934	0,17966351	610,855934
0,018	0,01579	0,69284774	0,055198627	174,3172631	0,17119924	616,3172631
0,019	0,01679	0,736726634	0,05333206	179,0890584	0,163444489	621,0890584
0,02	0,01779	0,780605529	0,051474531	183,1463804	0,156286595	625,1463804
0,021	0,01879	0,824484423	0,049620705	186,4746078	0,149636811	628,4746078
0,022	0,01979	0,868363317	0,047768135	189,0662801	0,143424155	631,0662801
0,023	0,02079	0,912242211	0,045915887	190,918259	0,137590926	632,918259
0,024	0,02179	0,956121106	0,04406369	192,0295614	0,132089492	634,0295614
0,025	0,02279	1	0,042211496	192,4	0,12688	634,4

σ_s	η	vs	ε_s
0			0
442	0	1	0,00221
460	0,093555094	0,879594802	0,00261484
475	0,171517672	0,777317523	0,003055379
490	0,249480249	0,672220656	0,003644637
505	0,327442827	0,562267127	0,004490748
520	0,405405405	0,44242006	0,004600768
535	0,483367983	#ЧИСЛО!	#ЧИСЛО!
550	0,561330561	#ЧИСЛО!	#ЧИСЛО!
565	0,639293139	#ЧИСЛО!	#ЧИСЛО!
595	0,795218295	#ЧИСЛО!	#ЧИСЛО!
610	0,873180873	#ЧИСЛО!	#ЧИСЛО!
625	0,951143451	#ЧИСЛО!	#ЧИСЛО!
634,4	1	0,12688	0,025

Арматура класса А800
 Параметры для расчета по СП 63.13330.2012 и СНБ 5.03.01-02

Es	200000				Es	200000	
σ _{пред}	800				σ _{пред}	695	604,3478261
γ _c	1,2				γ _c	1,2	
f _{tk}	880				f _{tk}	750,6	
k	1,1				k	1,08	

Двухлинейная		Трехлинейная			Двухлинейная		Трехлинейная	
σ	ε	σ	ε		σ	ε	σ	ε
0	0	0	0		0	0	0	0
800	0,004	720	0,0036		604,3478261	0,003021739	543,9130435	0,002719565
800	0,025	800	0,006		604,3478261	0,025	604,3478261	0,005021739
		880	0,0084				664,7826087	0,007323913
		880	0,015				664,7826087	0,015

Еврокод			
σ	ε	σ	ε
0	0	0	0
666,6666667	0,003333333	800	0,004
733,3333333	0,025	880	0,025

Расчет криволинейных диаграмм через деформации и напряжения по второй группе предельных состояний

$\varepsilon_{s,el}$	0,0034
$\varepsilon_{s0,2}$	0,006
$\varepsilon_{спред}$	0,025
$\varepsilon_{\Delta s0,2}$	0,0026
$\varepsilon_{\Delta sпред}$	0,0216

$\sigma_{s,el}$	680
$\sigma_{s0,2}$	800
$\sigma_{спред}$	976
$\sigma_{\Delta s0,2}$	120
$\sigma_{\Delta sпред}$	296

$\nu_{\Delta sпред}$	0,068518519
E_s	200000
c	2
k	7
n	20
$\nu_{\Delta 0}$	1
$\nu_{\Delta s0,2}$	0,230769231

ε_s	$\varepsilon_{\Delta s}$	$\eta_{\Delta d}$	$\nu_{\Delta s}$	$\sigma_{\Delta s}$	ν_s	σ_s
0,0034	0	0	1	0	1	680
0,0035	0,0001	0,00462963	0,930963319	18,61926638	0,998027523	698,6192664
0,004	0,0006	0,027777778	0,660885992	79,30631904	0,949132899	759,306319
0,0045	0,0011	0,050925926	0,483802867	106,4366308	0,873818479	786,4366308
0,005	0,0016	0,074074074	0,367667492	117,6535975	0,797653598	797,6535975
0,006	0,0026	0,12037037	0,240461131	125,0397882	0,67086649	800,0397882
0,0065	0,0031	0,143518519	0,206286579	127,8976788	0,621459753	807,8976788
0,007	0,0036	0,166666667	0,182796897	131,6137655	0,579724118	811,6137655
0,008	0,0046	0,212962963	0,154115055	141,7858502	0,513616156	821,7858502
0,009	0,0056	0,259259259	0,137837391	154,3778784	0,463543266	834,3778784
0,01	0,0066	0,305555556	0,127268071	167,9938539	0,423996927	847,9938539
0,011	0,0076	0,351851852	0,119637976	181,8497231	0,391749874	861,8497231
0,012	0,0086	0,398148148	0,113704555	195,5718353	0,364821598	875,5718353
0,013	0,0096	0,444444444	0,108828419	208,9505644	0,341904063	888,9505644
0,014	0,0106	0,490740741	0,104630544	221,8167529	0,322077412	901,8167529
0,015	0,0116	0,537037037	0,100864889	234,0065432	0,304668848	914,0065432
0,016	0,0126	0,583333333	0,097366705	245,3640956	0,28917628	925,3640956

0,017	0,0136	0,62962963	0,094026755	255,7527748	0,275221404	935,7527748
0,018	0,0146	0,675925926	0,09077504	265,0631158	0,262517532	945,0631158
0,019	0,0156	0,722222222	0,087568928	273,2150539	0,250846067	953,2150539
0,02	0,0166	0,768518519	0,084384167	280,1554346	0,240038859	960,1554346
0,021	0,0176	0,814814815	0,081208157	285,852711	0,229964931	965,852711
0,022	0,0186	0,861111111	0,078035116	290,2906317	0,220520598	970,2906317
0,023	0,0196	0,907407407	0,074862834	293,4623084	0,211622241	973,4623084
0,024	0,0206	0,953703704	0,071690672	295,3655695	0,20320116	975,3655695
0,025	0,0216	1	0,068518519	296	0,1952	976

σ_s	η	vs	ε_s
0			0
680	0	1	0,0034
700	0,067567568	0,921194298	0,003799416
720	0,135135135	0,841399051	0,004278588
740	0,202702703	0,760195148	0,004867171
760	0,27027027	0,676870669	0,005614071
780	0,337837838	0,590085503	0,005809212
800	0,405405405	0,496867532	0,006050435
820	0,472972973	#ЧИСЛО!	#ЧИСЛО!
840	0,540540541	#ЧИСЛО!	#ЧИСЛО!
860	0,608108108	#ЧИСЛО!	#ЧИСЛО!
880	0,675675676	#ЧИСЛО!	#ЧИСЛО!
920	0,810810811	#ЧИСЛО!	#ЧИСЛО!
940	0,878378378	#ЧИСЛО!	#ЧИСЛО!
960	0,945945946	#ЧИСЛО!	#ЧИСЛО!
976	1	0,1952	0,025

Расчет криволинейных диаграмм через деформации и напряжения по первой группе предельных состояний

$\varepsilon_{s,el}$	0,00295375
$\varepsilon_{s0,2}$	0,005475
$\varepsilon_{спред}$	0,025
$\varepsilon\Delta s_{0,2}$	0,00252125
$\varepsilon\Delta s_{спред}$	0,02204625

$\sigma_{s,el}$	590,75
$\sigma_{s0,2}$	695
$\sigma_{спред}$	847,9
$\sigma\Delta s_{0,2}$	104,25
$\sigma\Delta s_{спред}$	257,15

$\nu\Delta s_{спред}$	0,058320576
E_s	200000
c	2
k	7
n	20
$\nu\Delta 0$	1
$\nu\Delta s_{0,2}$	0,206742687

ε_s	$\varepsilon\Delta s$	$\eta\Delta d$	$\nu\Delta s$	$\sigma\Delta s$	νs	σs
0,00295375	0	0	1	0	1	590,75
0,003	4,625E-05	0,002097862	0,966639276	8,941413305	0,999485689	599,6914133
0,0035	0,00054625	0,024777456	0,677255303	73,99014181	0,949628774	664,7401418
0,004	0,00104625	0,047457051	0,486819347	101,8669484	0,865771185	692,6169484
0,005475	0,00252125	0,114361853	0,227390527	114,6616732	0,644211574	695,0005143
0,006	0,00304625	0,138175427	0,18894729	115,1161364	0,58822178	702,8661364
0,0065	0,00354625	0,160855021	0,164416522	116,6124182	0,544124937	707,3624182
0,007	0,00404625	0,183534615	0,147434064	119,3110161	0,50718644	710,0610161
0,008	0,00504625	0,228893803	0,126435819	127,6053502	0,448972094	718,3553502
0,009	0,00604625	0,274252991	0,114275871	138,1880974	0,40496561	728,9380974
0,01	0,00704625	0,319612179	0,106220868	149,6917577	0,370220879	740,4417577
0,011	0,00804625	0,364971367	0,100300421	161,4084524	0,341890206	752,1584524
0,012	0,00904625	0,410330555	0,095621671	173,003508	0,318230628	763,753508
0,013	0,01004625	0,455689743	0,091720175	184,2887609	0,298091831	775,0387609
0,014	0,01104625	0,501048931	0,088318352	195,1173192	0,2806669	785,8673192
0,015	0,01204625	0,546408119	0,085235216	205,3529443	0,265367648	796,1029443
0,016	0,01304625	0,591767307	0,082349352	214,8700463	0,251756264	805,6200463

0,017	0,01404625	0,637126495	0,079580205	223,5606909	0,239503144	814,3106909
0,018	0,01504625	0,682485684	0,076876143	231,3395319	0,228358203	822,0895319
0,019	0,01604625	0,727844872	0,074205719	238,1447046	0,218130185	828,8947046
0,02	0,01704625	0,77320406	0,071551046	243,9354033	0,208671351	834,6854033
0,021	0,01804625	0,818563248	0,068902827	248,6875281	0,199866078	839,4375281
0,022	0,01904625	0,863922436	0,066256799	252,3887107	0,191622434	843,1387107
0,023	0,02004625	0,909281624	0,06361133	255,0337245	0,183866027	845,7837245
0,024	0,02104625	0,954640812	0,06096595	256,6209254	0,176535609	847,3709254
0,025	0,02204625	1	0,058320576	257,15	0,16958	847,9

σ_s	η	ν_s	ε_s
0			0
590,75	0	1	0,00295375
610	0,074859032	0,910199453	0,003350914
630	0,152634649	0,815547928	0,003862434
650	0,230410266	0,718815092	0,00452133
670	0,308185884	0,618657992	0,005014947
690	0,385961501	0,512085669	0,005337154
710	0,463737118	#ЧИСЛО!	#ЧИСЛО!
730	0,541512736	#ЧИСЛО!	#ЧИСЛО!
750	0,619288353	#ЧИСЛО!	#ЧИСЛО!
770	0,69706397	#ЧИСЛО!	#ЧИСЛО!
790	0,774839588	#ЧИСЛО!	#ЧИСЛО!
810	0,852615205	#ЧИСЛО!	#ЧИСЛО!
830	0,930390822	#ЧИСЛО!	#ЧИСЛО!
847,9	1	0,16958	0,025

Арматура класса A1000
 Параметры для расчета по СП 63.13330.2012 и СНБ 5.03.01-02

Es	200000				Es	200000	
σ _{пред}	1000				σ _{пред}	870	756,5217391
γ _c	1,2				γ _c	1,2	
f _{tk}	1100				f _{tk}	939,6	
k	1,1				k	1,08	

Двухлинейная		Трехлинейная			Двухлинейная		Трехлинейная	
σ	ε	σ	ε		σ	ε	σ	ε
0	0	0	0		0	0	0	0
1000	0,005	900	0,0045		756,5217391	0,003782609	680,8695652	0,003404348
1000	0,025	1000	0,007		756,5217391	0,025	756,5217391	0,005782609
		1100	0,0095				832,173913	0,00816087
		1100	0,015				832,173913	0,015

Еврокод			
σ	ε	σ	ε
0	0	0	0
833,3333333	0,004166667	1000	0,005
916,6666667	0,025	1100	0,025

Расчет криволинейных диаграмм через деформации и напряжения по второй группе предельных состояний

$\varepsilon_{s,el}$	0,00425
$\varepsilon_{s0,2}$	0,007
$\varepsilon_{спред}$	0,025
$\varepsilon\Delta s_{0,2}$	0,00275
$\varepsilon\Delta s_{спред}$	0,02075

$\sigma_{s,el}$	850
$\sigma_{s0,2}$	1000
$\sigma_{спред}$	1220
$\sigma\Delta s_{0,2}$	150
$\sigma\Delta s_{спред}$	370

$\nu\Delta s_{спред}$	0,089156627
E_s	200000
c	2
k	7
n	20
$\nu\Delta 0$	1
$\nu\Delta s_{0,2}$	0,272727273

ε_s	$\varepsilon\Delta s$	$\eta\Delta d$	$\nu\Delta s$	$\sigma\Delta s$	νs	σs
0,00425	0	0	1	0	1	850
0,0045	0,00025	0,012048193	0,845915242	42,2957621	0,991439736	892,2957621
0,005	0,00075	0,036144578	0,62100297	93,15044546	0,943150445	943,1504455
0,0055	0,00125	0,060240964	0,474059265	118,5148162	0,880468015	968,5148162
0,006	0,00175	0,084337349	0,377480707	132,1182473	0,818431873	982,1182473
0,0065	0,00225	0,108433735	0,31328688	140,9790959	0,762291612	990,9790959
0,007	0,00275	0,13253012	0,269867883	148,4273358	0,713162383	1000,0273358
0,0075	0,00325	0,156626506	0,239788337	155,8624192	0,670574946	1005,862419
0,008	0,00375	0,180722892	0,218319998	163,7399988	0,633587499	1013,739999
0,0085	0,00425	0,204819277	0,202471821	172,1010479	0,601235911	1022,101048
0,009	0,00475	0,228915663	0,190356063	180,8382596	0,572687922	1030,83826
0,01	0,00575	0,277108434	0,172979099	198,9259641	0,524462982	1048,925964
0,011	0,00675	0,325301205	0,160905224	217,2220531	0,485100933	1067,222053
0,012	0,00775	0,373493976	0,151825178	235,3290257	0,452220427	1085,329026
0,013	0,00875	0,421686747	0,144586025	253,0255439	0,424240594	1103,025544
0,014	0,00975	0,469879518	0,138520358	270,1146985	0,400040964	1120,114698
0,015	0,01075	0,518072289	0,133200576	286,3812374	0,378793746	1136,381237

0,016	0,01175	0,56626506	0,128341944	301,6035677	0,359876115	1151,603568
0,017	0,01275	0,614457831	0,12375605	315,5779268	0,342817037	1165,577927
0,018	0,01375	0,662650602	0,119322224	328,1361164	0,327260032	1178,136116
0,019	0,01475	0,710843373	0,114966994	339,1526322	0,312934903	1189,152632
0,02	0,01575	0,759036145	0,110648562	348,5429701	0,299635743	1198,54297
0,021	0,01675	0,807228916	0,10634521	356,2564535	0,287203917	1206,256453
0,022	0,01775	0,855421687	0,102046977	362,2667671	0,275515174	1212,266767
0,023	0,01875	0,903614458	0,09775005	366,5626878	0,26447015	1216,562688
0,024	0,01975	0,951807229	0,093453332	369,1406594	0,253987637	1219,140659
0,025	0,02075	1	0,089156627	370	0,244	1220

σ_s	η	vs	ε_s
0			0
850	0	1	0,00425
870	0,054054054	0,938818912	0,004633481
890	0,108108108	0,876948832	0,005074412
910	0,162162162	0,81416551	0,005588544
930	0,216216216	0,750129208	0,005998932
950	0,27027027	0,684293565	0,006341465
970	0,324324324	0,615703718	0,00657165
990	0,378378378	0,542466859	0,006924981
1010	0,432432432	0,459904747	0,007180535
1030	0,486486486	#ЧИСЛО!	#ЧИСЛО!
1070	0,594594595	#ЧИСЛО!	#ЧИСЛО!
1130	0,756756757	#ЧИСЛО!	#ЧИСЛО!
1190	0,918918919	#ЧИСЛО!	#ЧИСЛО!
1220	1	0,244	0,025

Расчет криволинейных диаграмм через деформации и напряжения по первой группе предельных состояний

$\varepsilon_{s,el}$	0,0036975
$\varepsilon_{s0,2}$	0,00635
$\varepsilon_{спред}$	0,025
$\varepsilon\Delta s_{0,2}$	0,0026525
$\varepsilon\Delta s_{спред}$	0,0213025

$\sigma_{s,el}$	739,5
$\sigma_{s0,2}$	870
$\sigma_{спред}$	1061,4
$\sigma\Delta s_{0,2}$	130,5
$\sigma\Delta s_{спред}$	321,9

$\nu\Delta s_{спред}$	0,075554512
E_s	200000
c	2
k	7
n	20
$\nu\Delta 0$	1
$\nu\Delta s_{0,2}$	0,245994345

ε_s	$\varepsilon\Delta s$	$\eta\Delta d$	$\nu\Delta s$	$\sigma\Delta s$	νs	σs
0,0036975	0	0	1	0	1	739,5
0,004	0,0003025	0,014200211	0,810946185	49,06224419	0,985702805	788,5622442
0,0045	0,0008025	0,037671635	0,587487047	94,29167104	0,92643519	833,791671
0,005	0,0013025	0,061143058	0,441213294	114,9360632	0,854436063	854,4360632
0,0055	0,0018025	0,084614482	0,345165688	124,4322306	0,785392937	863,9322306
0,006	0,0023025	0,108085905	0,281616889	129,6845775	0,724320481	869,1845775
0,00635	0,0026525	0,124515902	0,250101177	132,6786745	0,686754862	870,0786745
0,0065	0,0028025	0,131557329	0,239012699	133,9666177	0,671897398	873,4666177
0,007	0,0033025	0,155028752	0,209886296	138,6298987	0,627235642	878,1298987
0,0075	0,0038025	0,178500176	0,189449934	144,076675	0,589051117	883,576675
0,008	0,0043025	0,2019716	0,174653841	150,2896298	0,556118519	889,7896298
0,009	0,0053025	0,248914447	0,15495605	164,3308906	0,502128273	903,8308906
0,01	0,0063025	0,295857294	0,142351449	179,4340016	0,459467001	918,9340016
0,011	0,0073025	0,342800141	0,133368091	194,7840966	0,424674589	934,2840966
0,012	0,0083025	0,389742988	0,126460983	209,9884622	0,395620193	949,4884622
0,013	0,0093025	0,436685835	0,120842514	224,8274967	0,370895191	964,3274967
0,014	0,0103025	0,483628682	0,116049157	239,1192884	0,349506889	978,6192884

0,015	0,0113025	0,530571529	0,1117812	252,6814037	0,330727135	992,1814037
0,016	0,0123025	0,577514376	0,107838287	265,3361048	0,314011283	1004,836105
0,017	0,0133025	0,624457223	0,104087652	276,9251993	0,298948588	1016,425199
0,018	0,0143025	0,67140007	0,100444232	287,3207253	0,285227979	1026,820725
0,019	0,0153025	0,718342917	0,096856225	296,4284759	0,272612757	1035,928476
0,02	0,0163025	0,765285765	0,093294162	304,1856157	0,260921404	1043,685616
0,021	0,0173025	0,812228612	0,089742732	310,5547231	0,250013029	1050,054723
0,022	0,0183025	0,859171459	0,08619491	315,5164686	0,23977647	1055,016469
0,023	0,0193025	0,906114306	0,08264801	319,0626424	0,230122314	1058,562642
0,024	0,0203025	0,953057153	0,079101256	321,1906515	0,220977219	1060,690652
0,025	0,0213025	1	0,075554512	321,9	0,21228	1061,4

σ_s	η	vs	ε_s
0			0
739,5	0	1	0,0036975
760	0,063684374	0,926732037	0,00410043
780	0,125815471	0,854396147	0,004564627
800	0,187946567	0,780891034	0,005122354
820	0,250077664	0,705694429	0,00580988
840	0,31220876	0,627889212	0,006189078
860	0,374339857	0,545653909	0,006280453
880	0,436470954	0,454517979	0,006580585
900	0,49860205	#ЧИСЛО!	#ЧИСЛО!
940	0,622864244	#ЧИСЛО!	#ЧИСЛО!
980	0,747126437	#ЧИСЛО!	#ЧИСЛО!
1020	0,87138863	#ЧИСЛО!	#ЧИСЛО!
1061,4	1	0,212280023	0,025