

NDM R1

Диаграммы деформирования арматуры

Приложение: NDM

Версия: R1

Описание: Диаграммный метод расчета плоских железобетонных сечений

Дата: 2021-05-28

Разработка: <https://constructionlab.ru>

E-mail: support@constructionlab.ru

Содержание

1	Общие положения.....	4
2	Криволинейные диаграммы деформирования арматуры	5
2.1	Арматура с условным пределом текучести	5
2.2	Арматура с физической площадкой текучести.....	9
3	Кусочно-линейные диаграммы деформирования арматуры.....	12
3.1	Арматура с условным пределом текучести	12
3.2	Арматура с физической площадкой текучести.....	13
4	Приложение А. Нормативные диаграммы деформирования арматуры с условным пределом текучести	14
5	Приложение Б. Нормативные диаграммы деформирования арматуры с физической площадкой текучести	23
6	Литература.....	26

1 Общие положения

Диаграммы деформирования арматуры в приложении NDM представлены двух видов:

- кусочно-линейные (двухлинейные или трехлинейные) в соответствии с СП 63.13330.2018 «СНиП 52-01-2003 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения» (с изменением № 1) [1];
- криволинейные в соответствии с методическим пособием «Автоматизированные методы расчета массивных железобетонных конструкций при объемном напряженном состоянии», разработанным ФАУ «ФЦС» [2].

Основные механические и деформационные характеристики арматуры принимаются по [1]. В данном руководстве приводятся только нормативные диаграммы деформирования арматуры. Для перехода к расчетным диаграммам необходимо нормативные сопротивления арматуры заменить на расчетные.

2 Криволинейные диаграммы деформирования арматуры

2.1 Арматура с условным пределом текучести

В соответствии с [1] арматура с условным пределом текучести классов по прочности на растяжение А600-А1000, Вр500, Вр1200-Вр1600, К1400-К1900. Дополнительные характеристики для построения диаграмм приведены в таблице 2.1 [2].

Таблица 2.1 – Дополнительные характеристики арматуры с условным пределом текучести

Класс арматуры	Характеристики		
	$\gamma_{s,el}$	$\gamma_{s,u}$	$\varepsilon_{s,u}$
А600	0,70	1,35	0,060
А800	0,70	1,28	0,070
А1000	0,70	1,23	0,060
Вр500	0,70	1,08	0,025
Вр1200	0,85	1,05	0,040
Вр1300	0,85	1,05	0,040
Вр1400	0,85	1,10	0,050
Вр1500	0,85	1,20	0,060
Вр1600	0,85	1,20	0,060
К1400-К1900	0,80	1,07	0,050

Примечания:

1. При использовании арматуры определенного класса необходимо уточнять допустимые диаметры по соответствующим стандартам.
2. Предельные расчетные относительные деформации арматуры с условным пределом текучести ограничиваются значением $\varepsilon_{s,ult} = 0,015$.

Аналитическая зависимость деформирования арматуры при растяжении и сжатии для выделенного участка диаграммы принимается в следующем виде (см. рисунок 1):

$$\varepsilon_s = \frac{\sigma_s}{E_s \nu_s}, \quad (2.1)$$

- где ε_s – относительная деформация арматуры;
 σ_s – напряжение в арматуре, МПа;
 E_s – модуль упругости арматуры, МПа;
 ν_s – коэффициент изменения секущего модуля арматуры:

$$\nu_s = \nu_{s,top} + (\nu_{s,start} - \nu_{s,top}) \sqrt{1 - \omega_s \eta_s - (1 - \omega_s) \eta_s^2}, \quad (2.2)$$

- где $\nu_{s,top}$ – коэффициент изменения секущего модуля арматуры в вершине участка диаграммы (положительная величина):

$$\nu_{s,top} = \left| \frac{\sigma_{s,top}}{E_s \varepsilon_{s,top}} \right|, \quad (2.3)$$

- где $\sigma_{s,top}$ – напряжение в арматуре в вершине участка диаграммы, МПа;
 $\varepsilon_{s,top}$ – относительная деформация арматуры в вершине участка диаграммы;
 $\nu_{s,start}$ – коэффициент изменения секущего модуля арматуры в начале участка диаграммы (положительная величина):

$$\nu_{s,start} = \left| \frac{\sigma_{s,start}}{E_s \varepsilon_{s,start}} \right|, \quad (2.4)$$

- где $\sigma_{s,start}$ – напряжение в арматуре в начале участка диаграммы, МПа;
 $\varepsilon_{s,start}$ – относительная деформация арматуры в начале участка диаграммы;
 ω_s – коэффициент, характеризующий кривизну диаграммы арматуры (учитывается промежуточная точка):

$$\omega_s = \frac{(\nu_{s,start} - \nu_{s,top})^2 (\eta_{s,inter}^2 - 1) + (\nu_{s,inter} - \nu_{s,top})^2}{\eta_{s,inter} (\eta_{s,inter} - 1) (\nu_{s,start} - \nu_{s,top})^2} \leq 2, \quad (2.5)$$

- где $\eta_{s,inter}$ – уровень напряжений в арматуре в промежуточной точке участка диаграммы:

$$\eta_{s,inter} = \left| \frac{\sigma_{s,inter} - \sigma_{s,start}}{\sigma_{s,top} - \sigma_{s,start}} \right|, \quad (2.6)$$

- $\sigma_{s,inter}$ – напряжение в арматуре в промежуточной точке участка диаграммы, МПа;
 $\nu_{s,inter}$ – коэффициент изменения секущего модуля арматуры в промежуточной точке участка диаграммы (положительная величина):

$$\nu_{s,inter} = \left| \frac{\sigma_{s,inter}}{E_s \varepsilon_{s,inter}} \right|, \quad (2.7)$$

где $\varepsilon_{s,inter}$ – относительная деформация арматуры в промежуточной точке участка диаграммы;

η_s – уровень напряжений в арматуре (положительная величина):

$$\eta_s = \left| \frac{\sigma_s - \sigma_{s,start}}{\sigma_{s,top} - \sigma_{s,start}} \right|. \quad (2.8)$$

Диаграмма для арматуры с условным пределом текучести делится на два участка (см. рисунок 1):

- линейный участок $O-E$;
- криволинейный участок $E-A-U$.

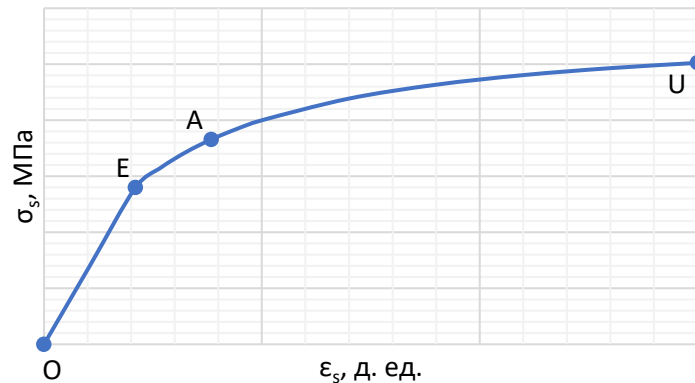


Рисунок 1 – Криволинейная диаграмма деформирования арматуры с условным пределом текучести

Линейный участок $O-E$

Линейный участок описывается формулой (2.1), в которой принимается $\nu_s = 1$.

Конец линейного участка – точка E :

$$\sigma_{s,E} = \pm R_{s,n} \gamma_{s,el}, \quad (2.9)$$

где $R_{s,n}$ – нормативное сопротивление арматуры растяжению при остаточном относительном удлинении 0,1 или 0,2 % с обеспеченностью 0,95, МПа;

$\gamma_{s,el}$ – см. таблицу 2.1;

$$\varepsilon_{s,E} = \frac{\sigma_{s,E}}{E_s}. \quad (2.10)$$

В формуле (2.9) и далее положительное значение $R_{s,n}$ принимается при растяжении, отрицательное – при сжатии.

Криволинейный участок E-A-U

Начало криволинейного участка – точка E:

$$\sigma_{s,start} = \sigma_{s,E} = \pm R_{s,n} \gamma_{s,el}, \quad (2.11)$$

где $\gamma_{s,el}$ – см. таблицу 2.1;

$$\varepsilon_{s,start} = \varepsilon_{s,E} = \frac{\sigma_{s,E}}{E_s}; \quad (2.12)$$

$$v_{s,start} = \left| \frac{\sigma_{s,start}}{E_s \varepsilon_{s,start}} \right| = \left| \frac{\sigma_{s,E}}{E_s \varepsilon_{s,E}} \right| = 1. \quad (2.13)$$

Вершина криволинейного участка – точка U:

$$\sigma_{s,top} = \sigma_{s,U} = \pm R_{s,n} \gamma_{s,u}, \quad (2.14)$$

где $\gamma_{s,u}$ – см. таблицу 2.1;

$$\varepsilon_{s,top} = \varepsilon_{s,U} = \pm \varepsilon_{s,u}, \quad (2.15)$$

где $\varepsilon_{s,u}$ – см. таблицу 2.1;

$$v_{s,top} = \left| \frac{\sigma_{s,top}}{E_s \varepsilon_{s,top}} \right| = \left| \frac{\sigma_{s,U}}{E_s \varepsilon_{s,U}} \right|. \quad (2.16)$$

Промежуточная точка криволинейного участка – точка A:

$$\sigma_{s,inter} = \sigma_{s,A} = \pm R_{s,n}; \quad (2.17)$$

$$\varepsilon_{s,inter} = \varepsilon_{s,A} = \pm \left(\frac{R_{s,n}}{E_s} + 0,002 \right); \quad (2.18)$$

$$v_{s,inter} = \left| \frac{\sigma_{s,inter}}{E_s \varepsilon_{s,inter}} \right| = \left| \frac{\sigma_{s,A}}{E_s \varepsilon_{s,A}} \right| = \frac{R_{s,n}}{R_{s,n} + 0,002 E_s}; \quad (2.19)$$

$$\eta_{s,inter} = \left| \frac{\sigma_{s,inter} - \sigma_{s,start}}{\sigma_{s,top} - \sigma_{s,start}} \right| = \left| \frac{\sigma_{s,A} - \sigma_{s,E}}{\sigma_{s,U} - \sigma_{s,E}} \right| = \frac{1 - \gamma_{s,el}}{\gamma_{s,u} - \gamma_{s,el}}. \quad (2.20)$$

2.2 Арматура с физической площадкой текучести

В соответствии с [1] арматура с физической площадкой текучести классов по прочности на растяжение A240, A400, A500, B500. Дополнительные характеристики для построения диаграмм приведены в таблице 2.2 [2].

Таблица 2.2 – Дополнительные характеристики арматуры с физической площадкой текучести

Класс арматуры	Характеристики				
	$\gamma_{s,el}$	$\gamma_{s,p}$	$\epsilon_{s,p}$	$\gamma_{s,u}$	$\epsilon_{s,u}$
A240	0,97	1,01	0,015	2,00	0,190
A400	0,90	1,05	0,012	1,45	0,140
A500	0,85	1,07	0,008	1,30	0,100
B500	0,80	1,04	0,005	1,10	0,030

Примечания:

1. При использовании арматуры определенного класса необходимо уточнять допустимые диаметры по соответствующим стандартам.
2. Предельные расчетные относительные деформации арматуры с физической площадкой текучести ограничиваются значением $\epsilon_{s,ult} = 0,025$.

Аналитическая зависимость деформирования арматуры с физической площадкой текучести описывается формулами (2.1) – (2.8) и делится на три участка (см. рисунок 2):

- линейный участок $O-E$;
- криволинейный участок $E-A-P$;
- криволинейный участок $P-K-U$.

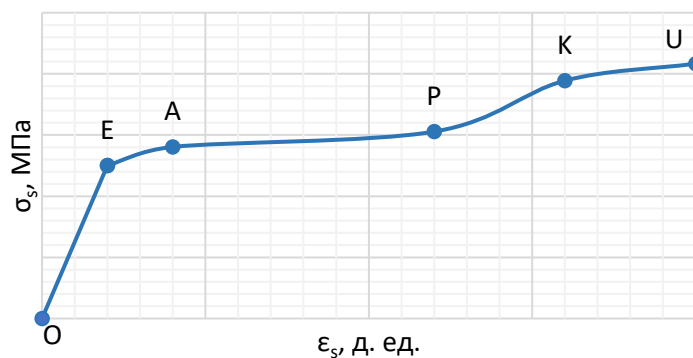


Рисунок 2 – Криволинейная диаграмма деформирования арматуры с физической площадкой текучести

Линейный участок O-E

Линейный участок описывается формулой (2.1), в которой принимается $\nu_s = 1$.

Конец линейного участка – точка E:

$$\sigma_{s,E} = \pm R_{s,n} \gamma_{s,el}, \quad (2.21)$$

где $\gamma_{s,el}$ – см. таблицу 2.2;

$$\varepsilon_{s,E} = \frac{\sigma_{s,E}}{E_s}. \quad (2.22)$$

Криволинейный участок E-A-P

Начало криволинейного участка – точка E:

$$\sigma_{s,start} = \sigma_{s,E} = \pm R_{s,n} \gamma_{s,el}, \quad (2.23)$$

где $\gamma_{s,el}$ – см. таблицу 2.2;

$$\varepsilon_{s,start} = \varepsilon_{s,E} = \frac{\sigma_{s,E}}{E_s}; \quad (2.24)$$

$$\nu_{s,start} = \left| \frac{\sigma_{s,start}}{E_s \varepsilon_{s,start}} \right| = \left| \frac{\sigma_{s,E}}{E_s \varepsilon_{s,E}} \right| = 1. \quad (2.25)$$

Вершина криволинейного участка – точка P:

$$\sigma_{s,top} = \sigma_{s,P} = \pm R_{s,n} \gamma_{s,p}, \quad (2.26)$$

где $\gamma_{s,p}$ – см. таблицу 2.2;

$$\varepsilon_{s,top} = \varepsilon_{s,P} = \pm \varepsilon_{s,p}, \quad (2.27)$$

где $\varepsilon_{s,p}$ – см. таблицу 2.2;

$$\nu_{s,top} = \left| \frac{\sigma_{s,top}}{E_s \varepsilon_{s,top}} \right| = \left| \frac{\sigma_{s,P}}{E_s \varepsilon_{s,P}} \right|. \quad (2.28)$$

Промежуточная точка криволинейного участка – точка A:

$$\sigma_{s,inter} = \sigma_{s,A} = \pm R_{s,n}; \quad (2.29)$$

$$\varepsilon_{s,inter} = \varepsilon_{s,A} = \pm \left(\frac{R_{s,n}}{E_s} + 0,002 \right); \quad (2.30)$$

$$\nu_{s,inter} = \left| \frac{\sigma_{s,inter}}{E_s \varepsilon_{s,inter}} \right| = \left| \frac{\sigma_{s,A}}{E_s \varepsilon_{s,A}} \right| = \frac{R_{s,n}}{R_{s,n} + 0,002 E_s}; \quad (2.31)$$

$$\eta_{s,inter} = \left| \frac{\sigma_{s,inter} - \sigma_{s,start}}{\sigma_{s,top} - \sigma_{s,start}} \right| = \left| \frac{\sigma_{s,A} - \sigma_{s,E}}{\sigma_{s,P} - \sigma_{s,E}} \right| = \frac{1 - \gamma_{s,el}}{\gamma_{s,p} - \gamma_{s,el}}. \quad (2.32)$$

Криволинейный участок P-K-U

Начало криволинейного участка – точка P (см. формулы (2.26) и (2.27):

$$\sigma_{s,start} = \sigma_{s,P}; \quad (2.33)$$

$$\varepsilon_{s,start} = \varepsilon_{s,P}; \quad (2.34)$$

$$v_{s,start} = \left| \frac{\sigma_{s,start}}{E_s \varepsilon_{s,start}} \right| = \left| \frac{\sigma_{s,P}}{E_s \varepsilon_{s,P}} \right|. \quad (2.35)$$

Вершина криволинейного участка – точка U:

$$\sigma_{s,top} = \sigma_{s,U} = \pm R_{s,n} \gamma_{s,u}, \quad (2.36)$$

где $\gamma_{s,u}$ – см. таблицу 2.2.

$$\varepsilon_{s,top} = \varepsilon_{s,U} = \pm \varepsilon_{s,u}, \quad (2.37)$$

где $\varepsilon_{s,u}$ – см. таблицу 2.2.

$$v_{s,top} = \left| \frac{\sigma_{s,top}}{E_s \varepsilon_{s,top}} \right| = \left| \frac{\sigma_{s,U}}{E_s \varepsilon_{s,U}} \right|. \quad (2.38)$$

Промежуточная точка криволинейного участка – точка K:

$$\sigma_{s,inter} = \sigma_{s,K} = \pm (\sigma_{s,P} + 0,2(\sigma_{s,U} - \sigma_{s,P})) = \pm R_{s,n} (0,8\gamma_{s,p} + 0,2\gamma_{s,u}); \quad (2.39)$$

$$\varepsilon_{s,inter} = \varepsilon_{s,K} = 1,2\varepsilon_{s,p}; \quad (2.40)$$

$$v_{s,inter} = \left| \frac{\sigma_{s,inter}}{E_s \varepsilon_{s,inter}} \right| = \left| \frac{\sigma_{s,K}}{E_s \varepsilon_{s,K}} \right|; \quad (2.41)$$

$$\eta_{s,inter} = \left| \frac{\sigma_{s,inter} - \sigma_{s,start}}{\sigma_{s,top} - \sigma_{s,start}} \right| = \left| \frac{\sigma_{s,K} - \sigma_{s,P}}{\sigma_{s,U} - \sigma_{s,P}} \right| = 0,2. \quad (2.42)$$

3 Кусочно-линейные диаграммы деформирования арматуры

3.1 Арматура с условным пределом текучести

Аналитическая зависимость деформирования арматуры с условным пределом текучести принимается трехлинейной и описывается следующими формулами (см. рисунок 3):

При $0 \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_{s,A}$,

$$\sigma_s = E_s \varepsilon_s, \quad (3.1)$$

При $\varepsilon_{s,A} < \varepsilon_s < \varepsilon_{s,B}$

$$\sigma_s = \left(0,1 \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{s,A}}{\varepsilon_{s,0.2} - \varepsilon_{s,A}} + 0,9 \right) R_{s,n}, \quad (3.2)$$

При $\varepsilon_{s,B} \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_{s,C}$

$$\sigma_s = 1,1 R_{s,n}, \quad (3.3)$$

В формулах (3.1) – (3.3):

$$\varepsilon_{s,A} = \frac{0,9 R_{s,n}}{E_s}; \quad (3.4)$$

$$\varepsilon_{s,B} = \frac{1,1 R_{s,n}}{E_s} + 0,004; \quad (3.5)$$

$$\varepsilon_{s,C} = 0,015; \quad (3.6)$$

$$\varepsilon_{s,0.2} = \frac{R_{s,n}}{E_s} + 0,002. \quad (3.7)$$

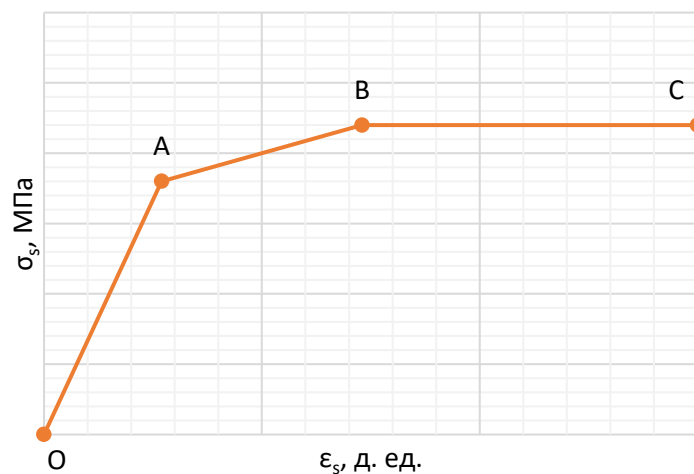


Рисунок 3 – Трехлинейная диаграмма деформирования арматуры с условным пределом текучести

3.2 Арматура с физической площадкой текучести

Аналитическая зависимость деформирования арматуры физической площадкой текучести принимается двухлинейной и описывается следующими формулами (см. рисунок 4):

При $0 \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_{s,A}$,

$$\sigma_s = E_s \varepsilon_s, \quad (3.8)$$

При $\varepsilon_{s,A} \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_{s,C}$

$$\sigma_s = R_{s,n}, \quad (3.9)$$

В формулах (3.8) и (3.9):

$$\varepsilon_{s,A} = \frac{R_{s,n}}{E_s}; \quad (3.10)$$

$$\varepsilon_{s,C} = 0,025. \quad (3.11)$$

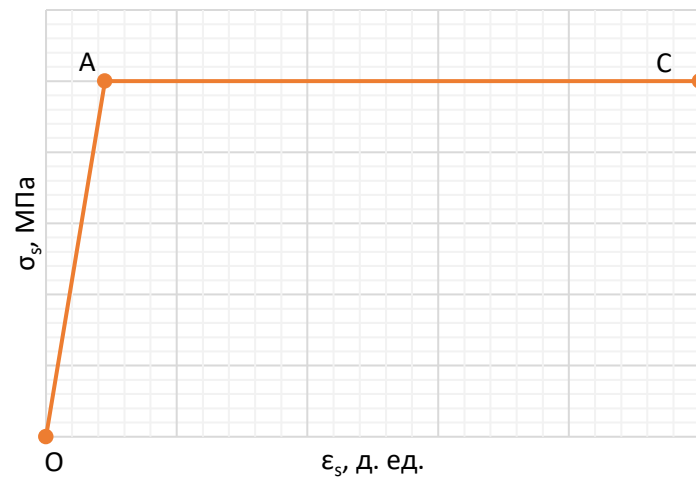
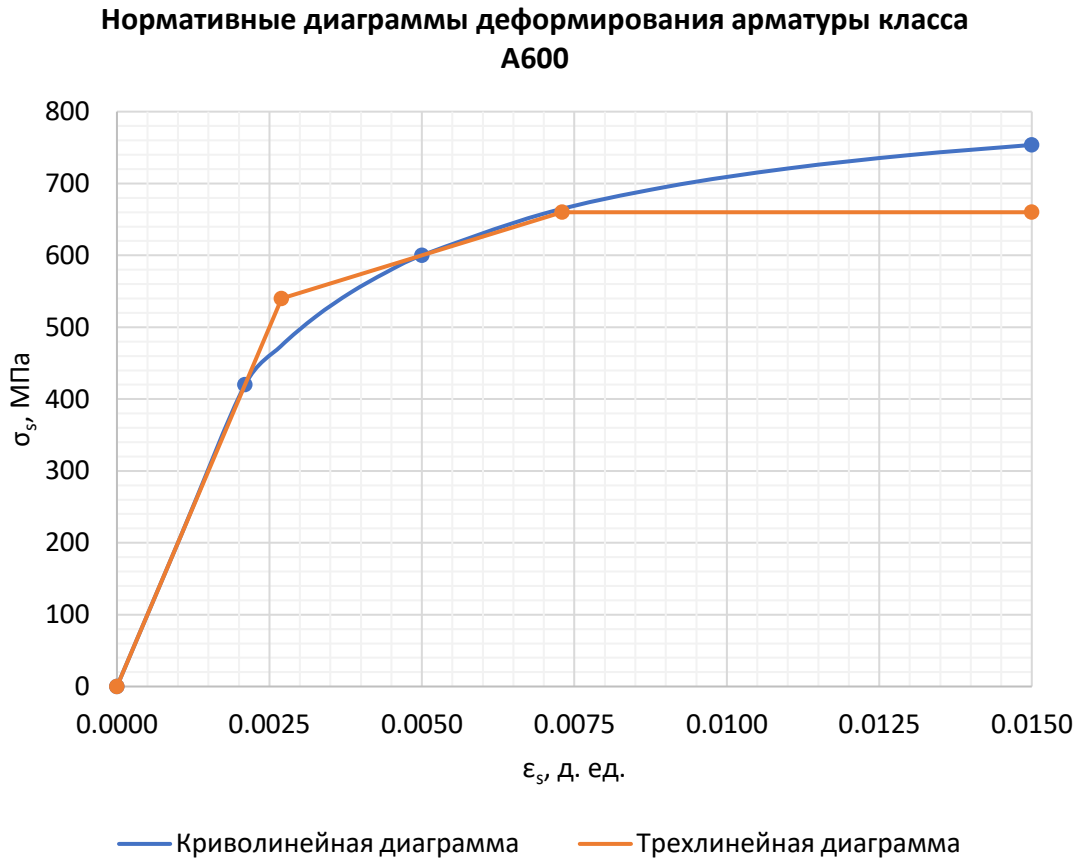
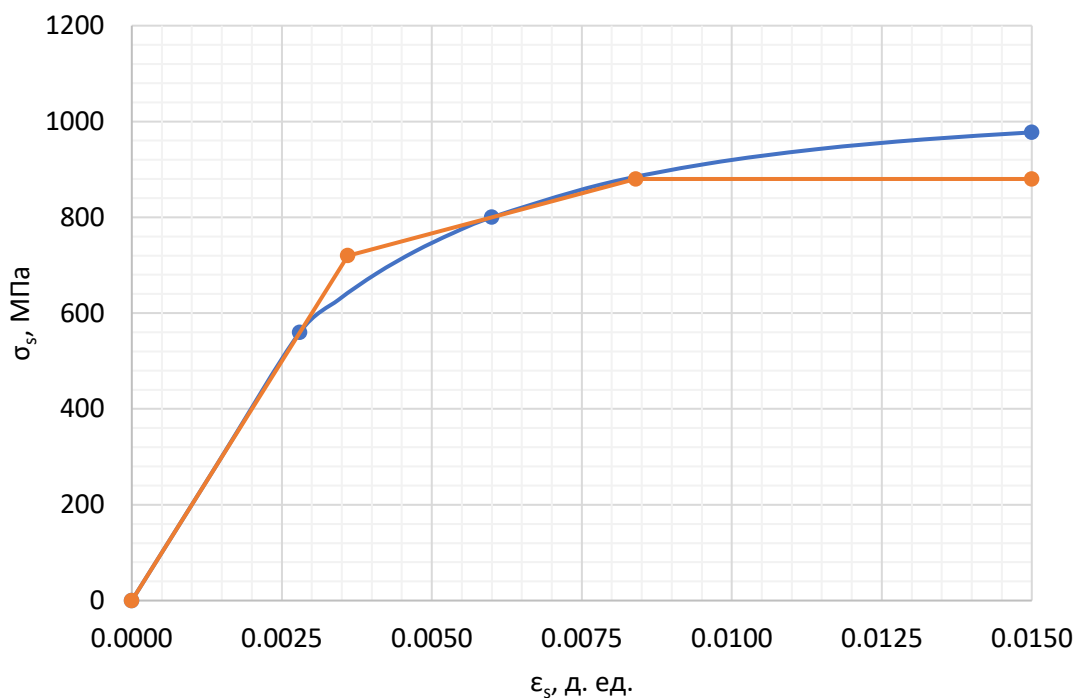


Рисунок 4 – Двухлинейная диаграмма деформирования арматуры с физической площадкой текучести

4 Приложение А. Нормативные диаграммы деформирования арматуры с условным пределом текучести

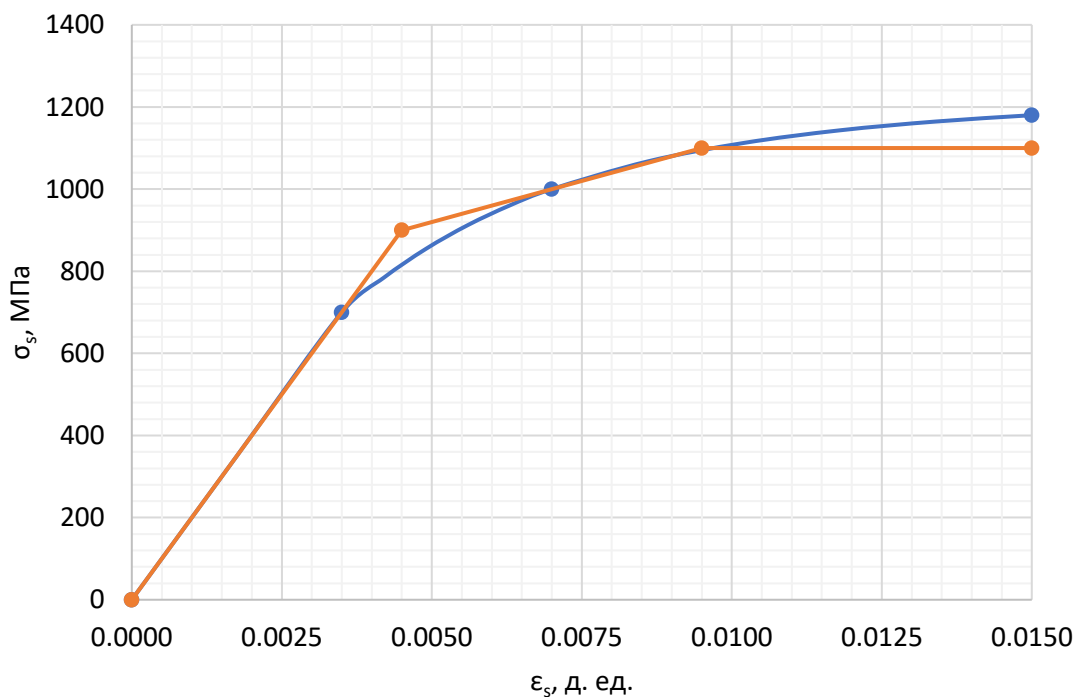


Нормативные диаграммы деформирования арматуры класса A800



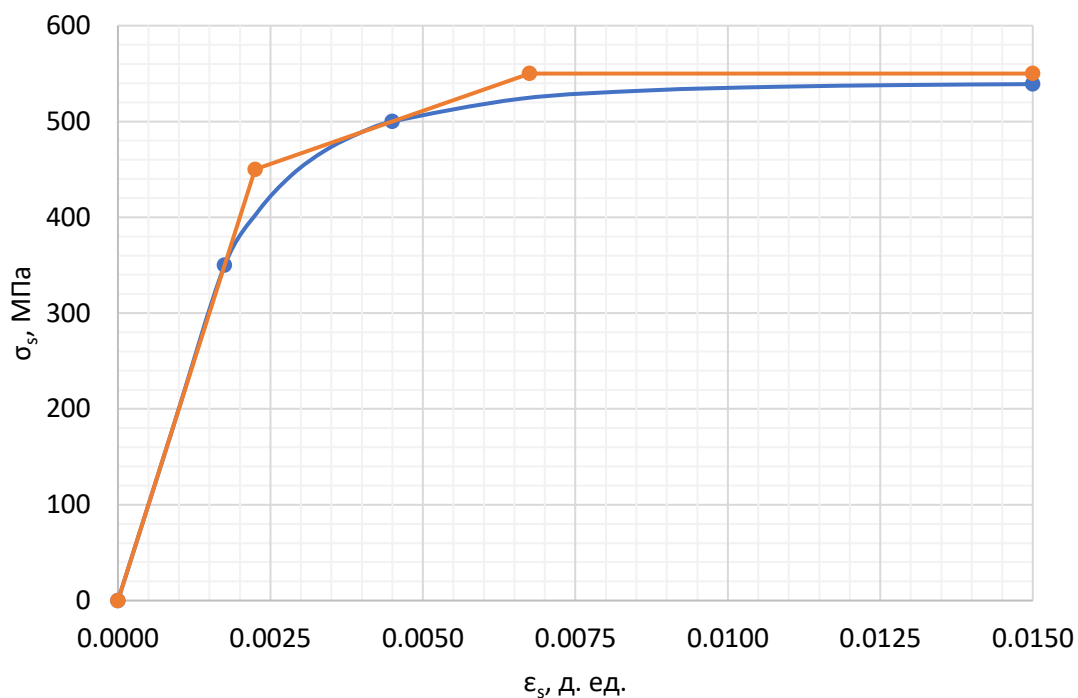
— Криволинейная диаграмма — Трехлинейная диаграмма

Нормативные диаграммы деформирования арматуры класса A1000



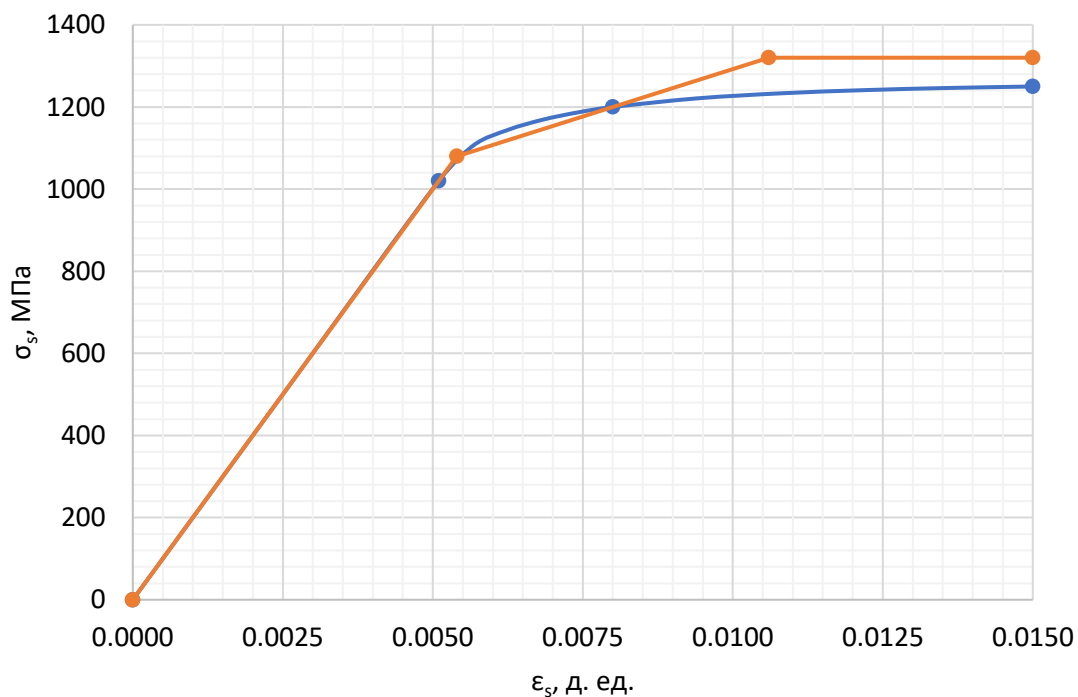
— Криволинейная диаграмма — Трехлинейная диаграмма

Нормативные диаграммы деформирования арматуры класса Вр500



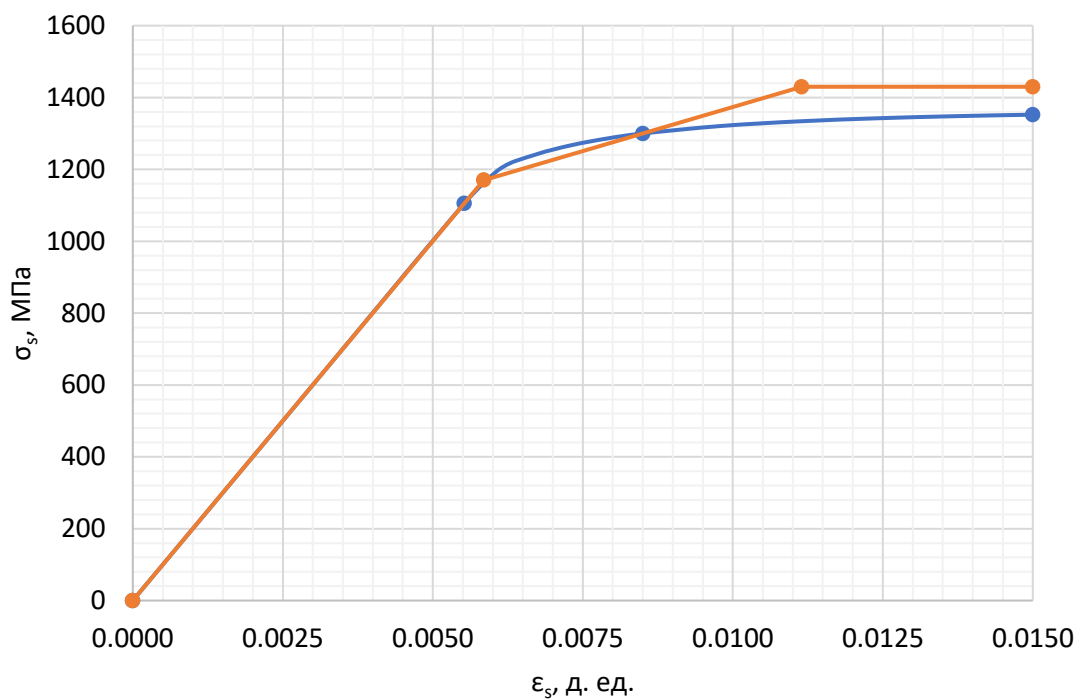
— Криволинейная диаграмма — Трехлинейная диаграмма

Нормативные диаграммы деформирования арматуры класса Вр1200



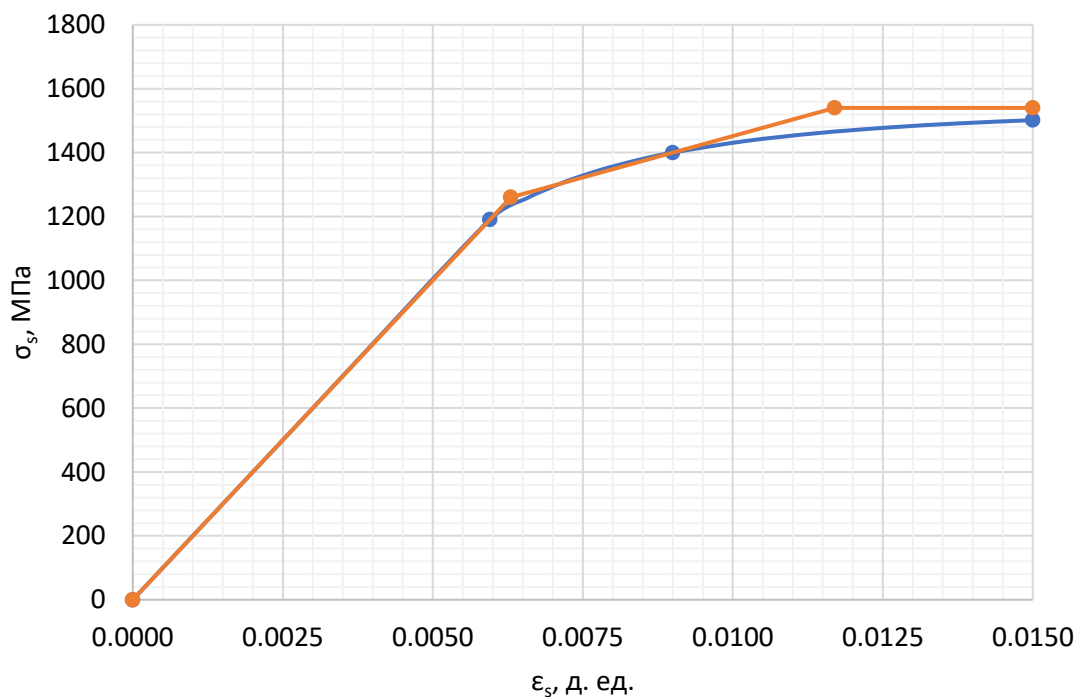
— Криволинейная диаграмма — Трехлинейная диаграмма

Нормативные диаграммы деформирования арматуры класса Вр1300



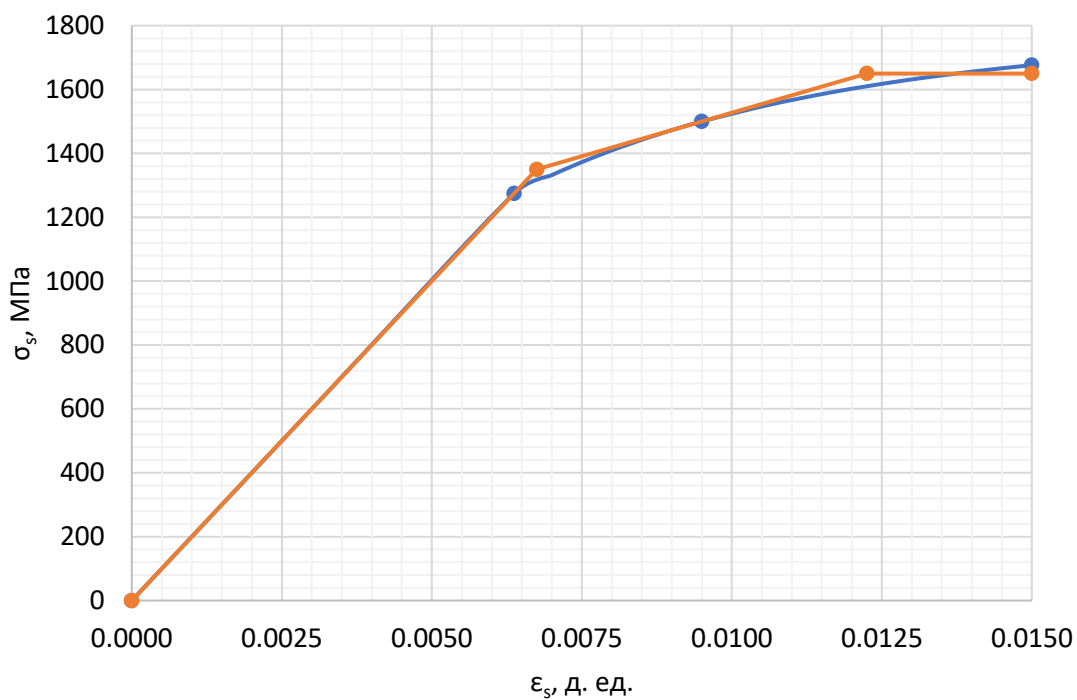
— Криволинейная диаграмма — Трехлинейная диаграмма

Нормативные диаграммы деформирования арматуры класса Вр1400



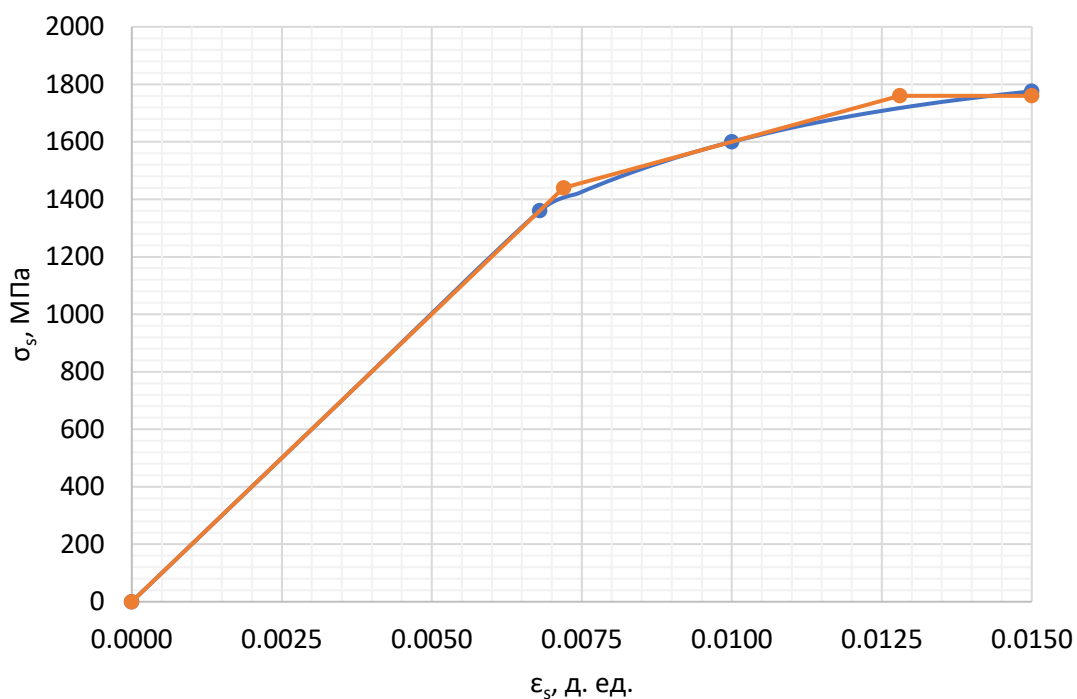
— Криволинейная диаграмма — Трехлинейная диаграмма

Нормативные диаграммы деформирования арматуры класса Вр1500



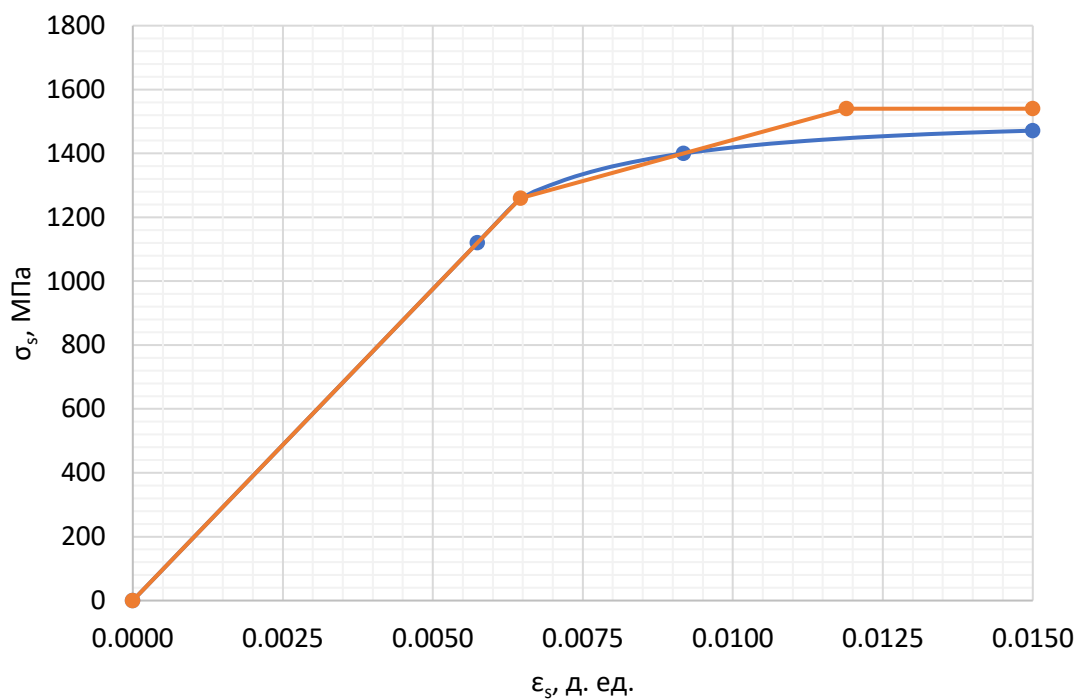
— Криволинейная диаграмма — Трехлинейная диаграмма

Нормативные диаграммы деформирования арматуры класса Вр1600



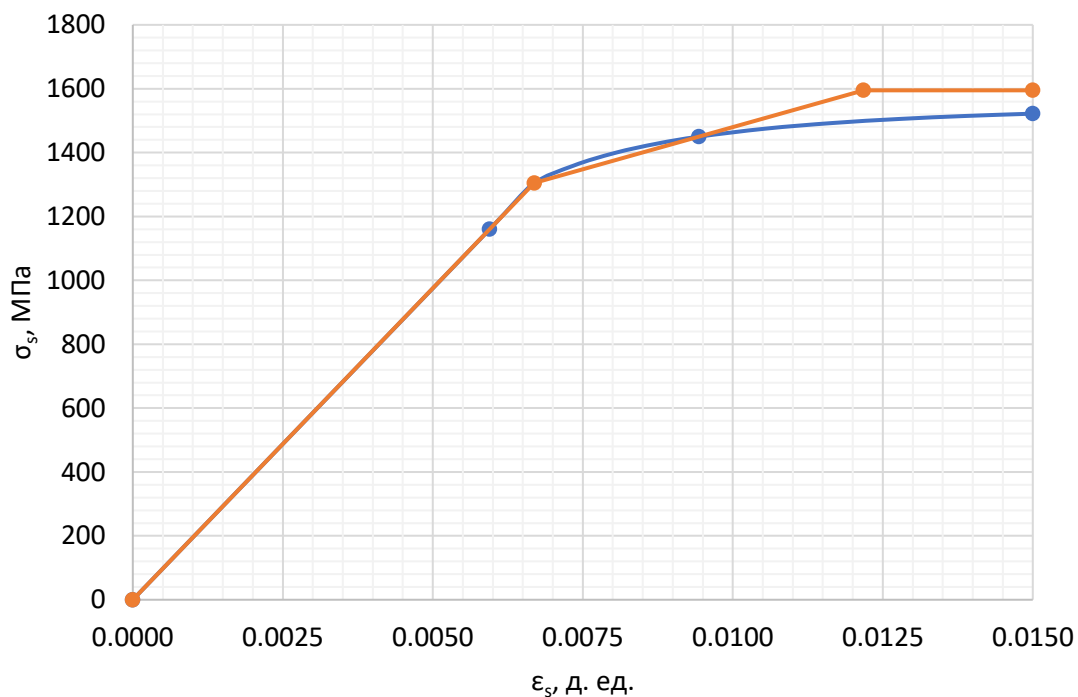
— Криволинейная диаграмма — Трехлинейная диаграмма

Нормативные диаграммы деформирования арматуры класса К1400



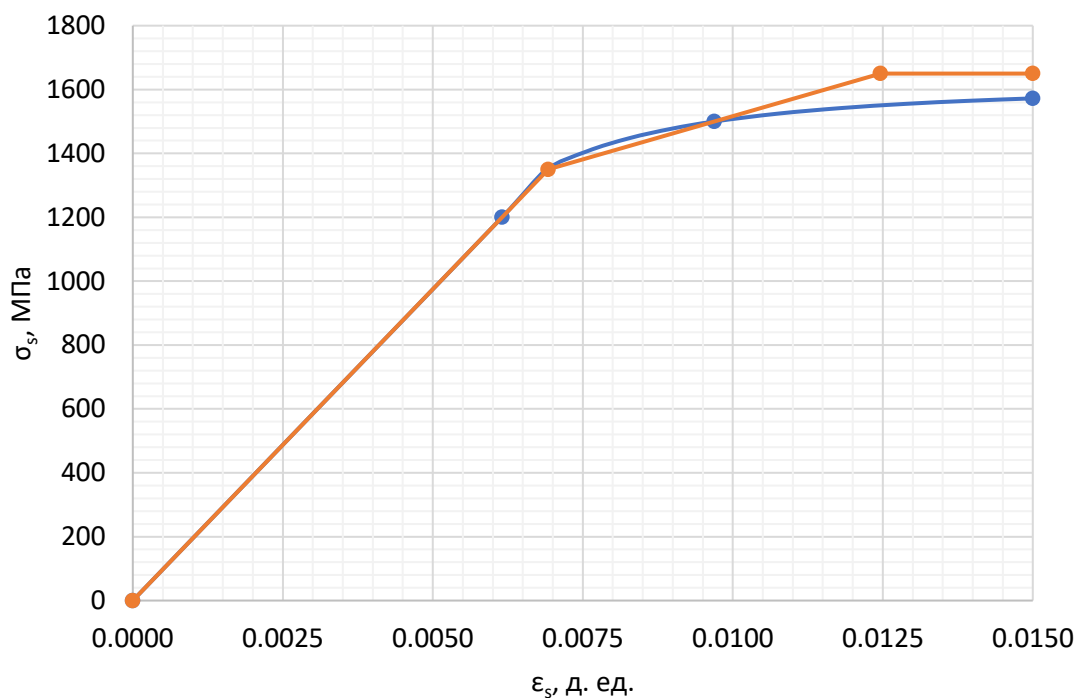
— Криволинейная диаграмма — Трехлинейная диаграмма

Нормативные диаграммы деформирования арматуры класса К1450



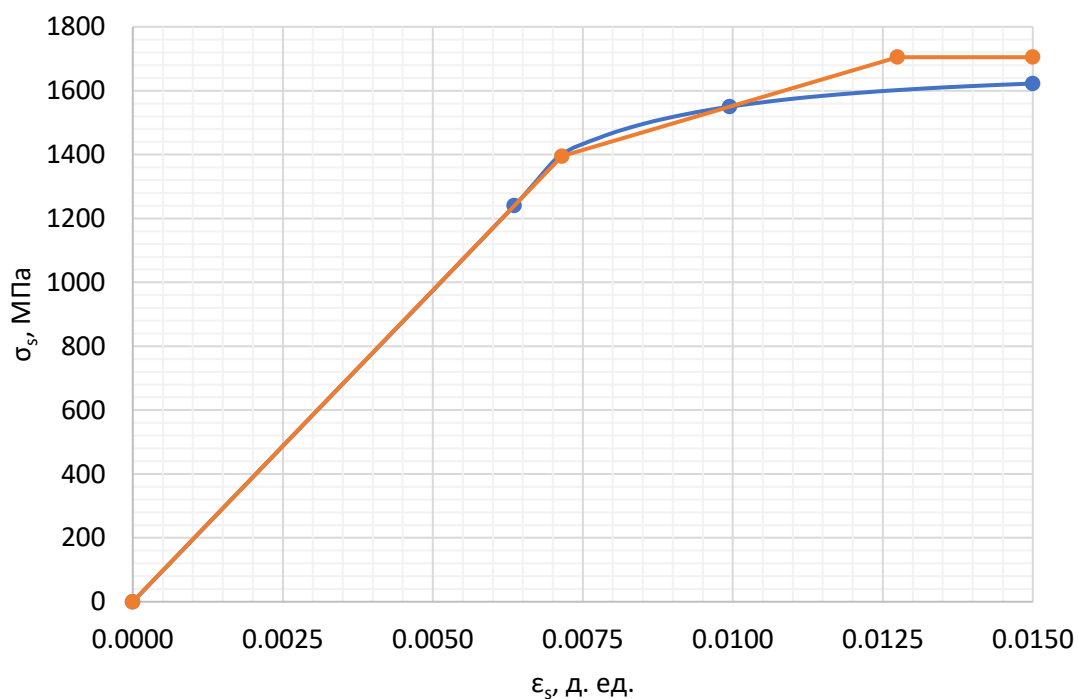
— Криволинейная диаграмма — Трехлинейная диаграмма

Нормативные диаграммы деформирования арматуры класса K1500



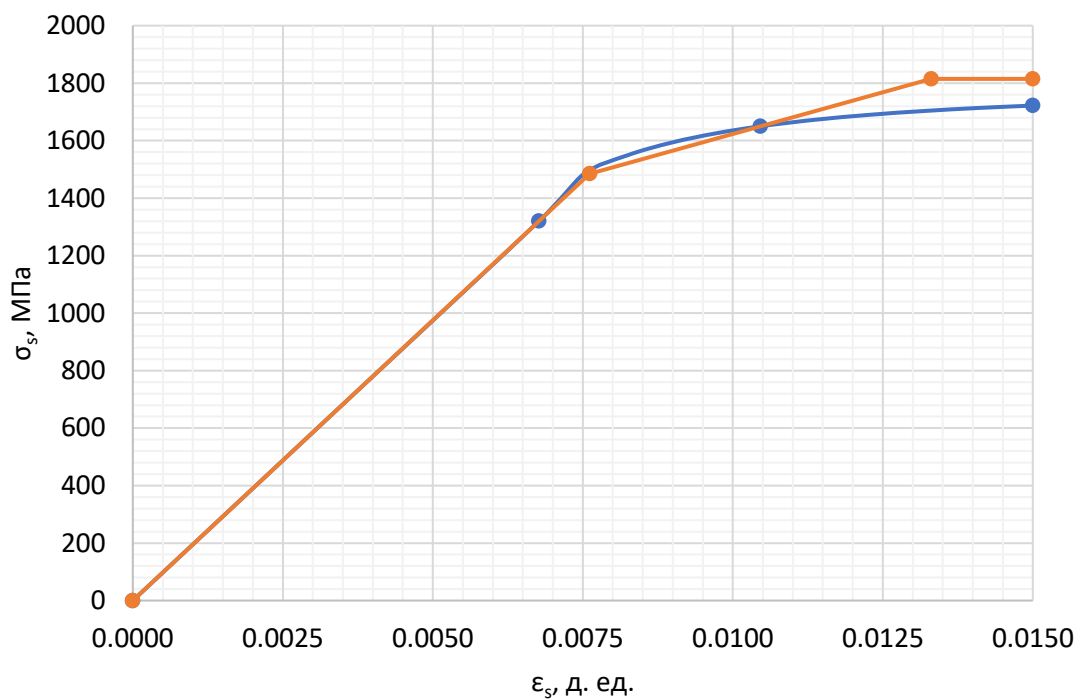
— Криволинейная диаграмма — Трехлинейная диаграмма

Нормативные диаграммы деформирования арматуры класса K1550



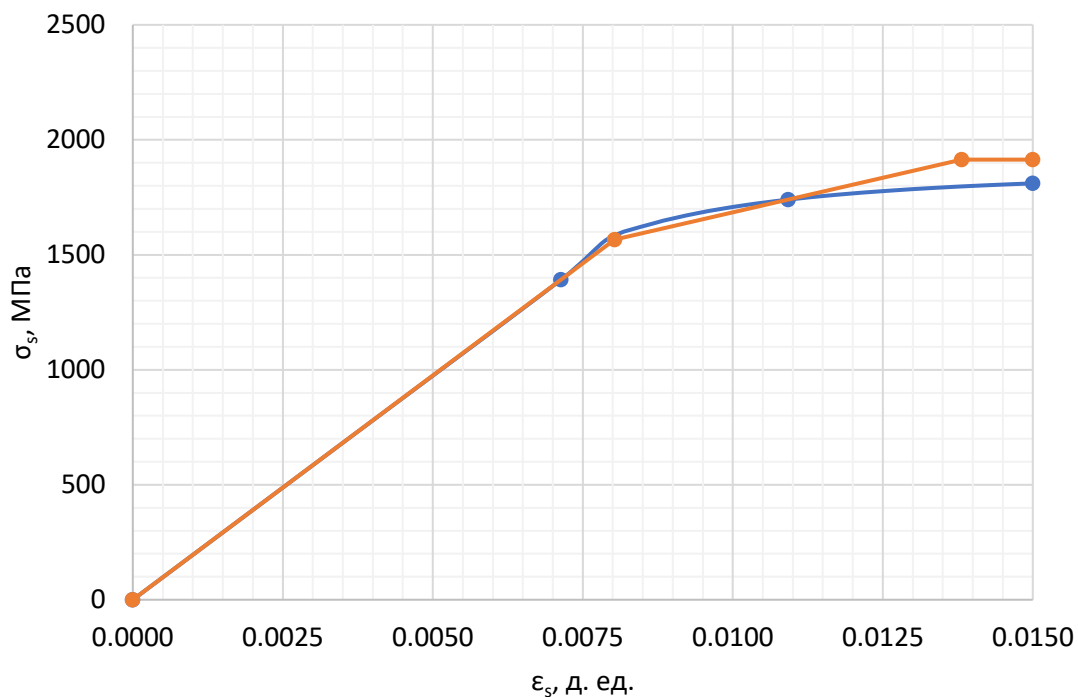
— Криволинейная диаграмма — Трехлинейная диаграмма

Нормативные диаграммы деформирования арматуры класса K1650



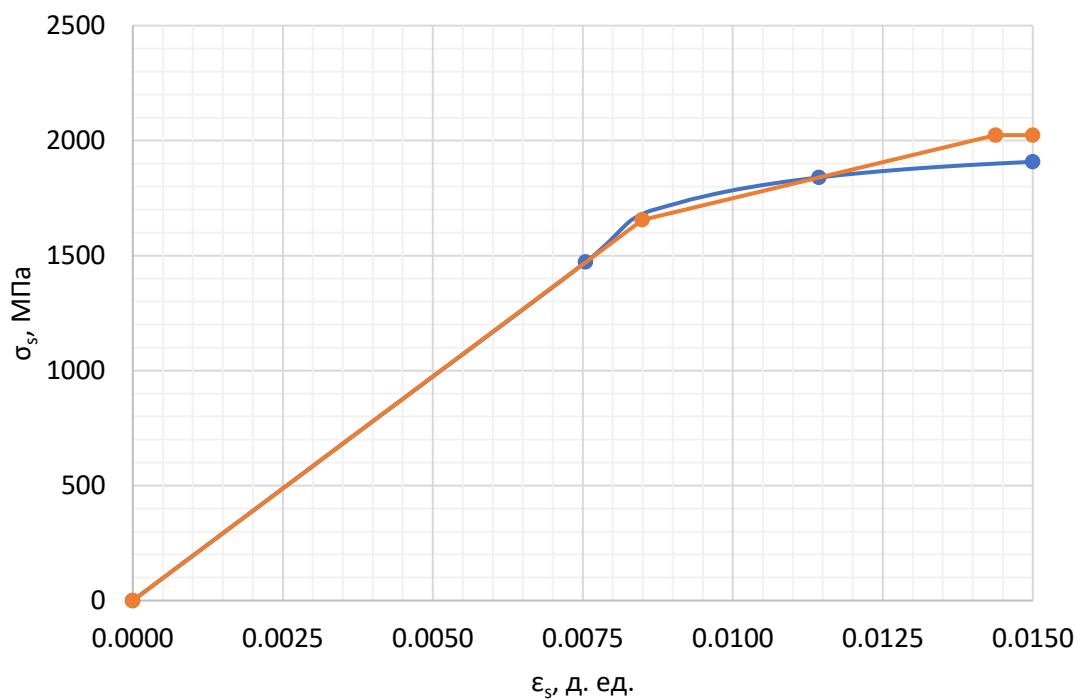
— Криволинейная диаграмма — Трехлинейная диаграмма

Нормативные диаграммы деформирования арматуры класса K1750



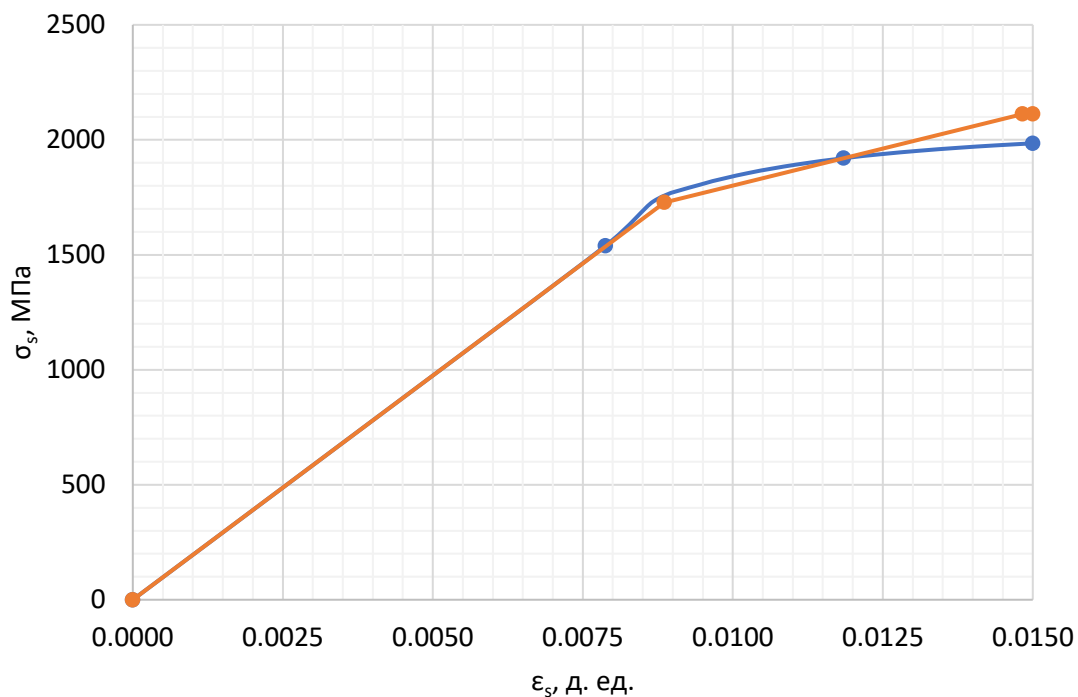
— Криволинейная диаграмма — Трехлинейная диаграмма

Нормативные диаграммы деформирования арматуры класса K1850



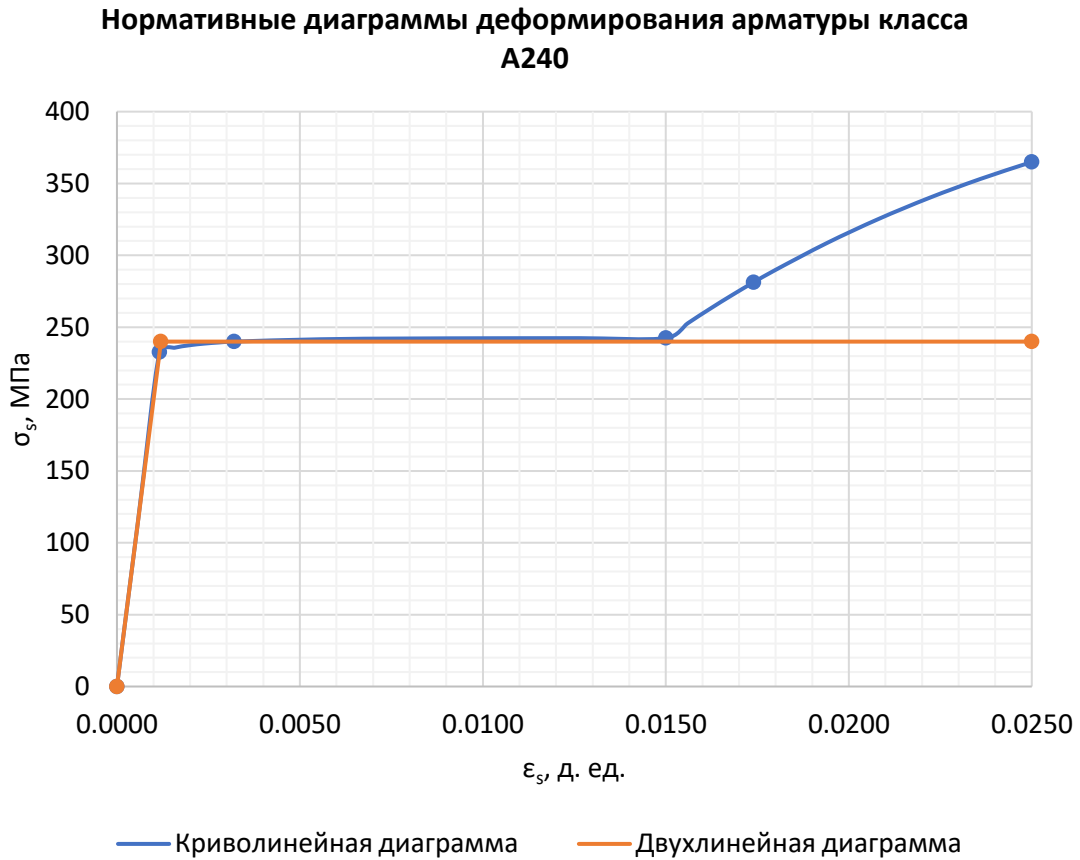
— Криволинейная диаграмма — Трехлинейная диаграмма

Нормативные диаграммы деформирования арматуры класса K1900

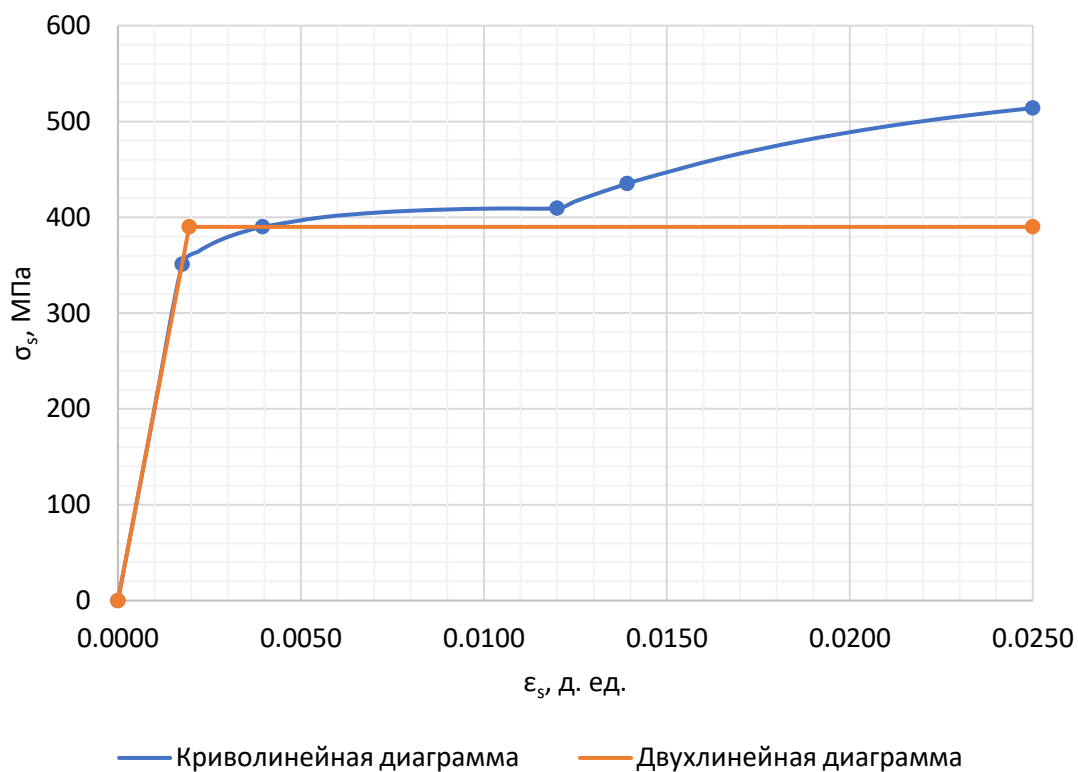


— Криволинейная диаграмма — Трехлинейная диаграмма

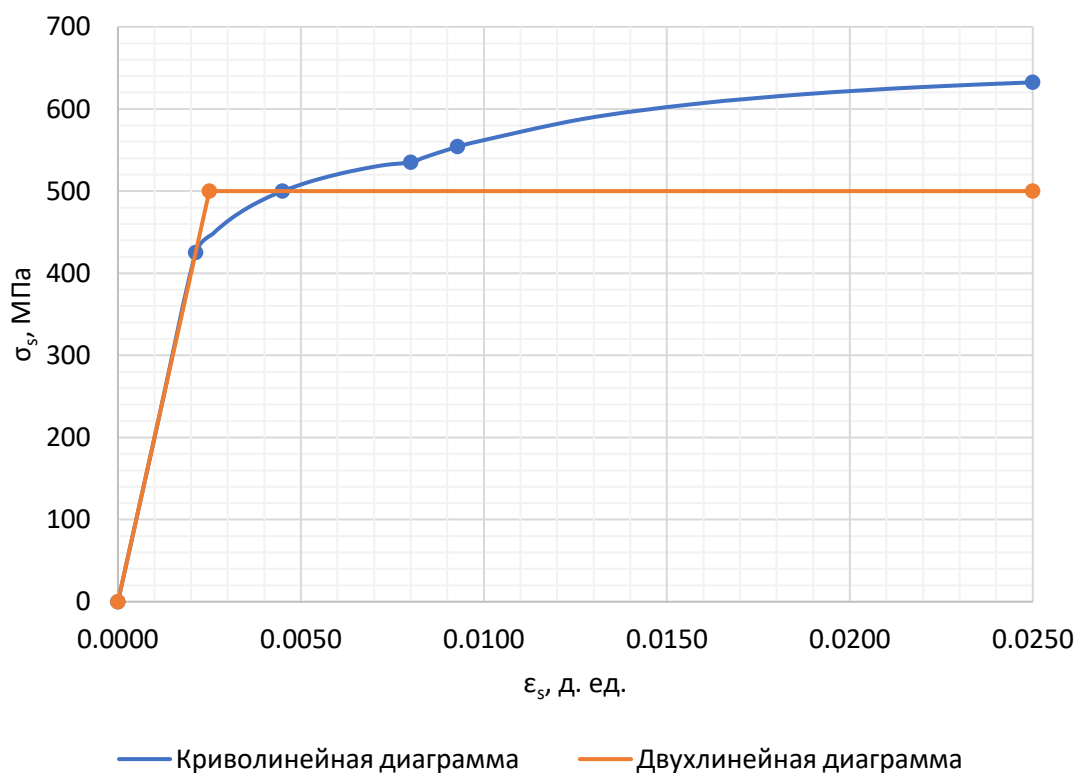
5 Приложение Б. Нормативные диаграммы деформирования арматуры с физической площадкой текучести



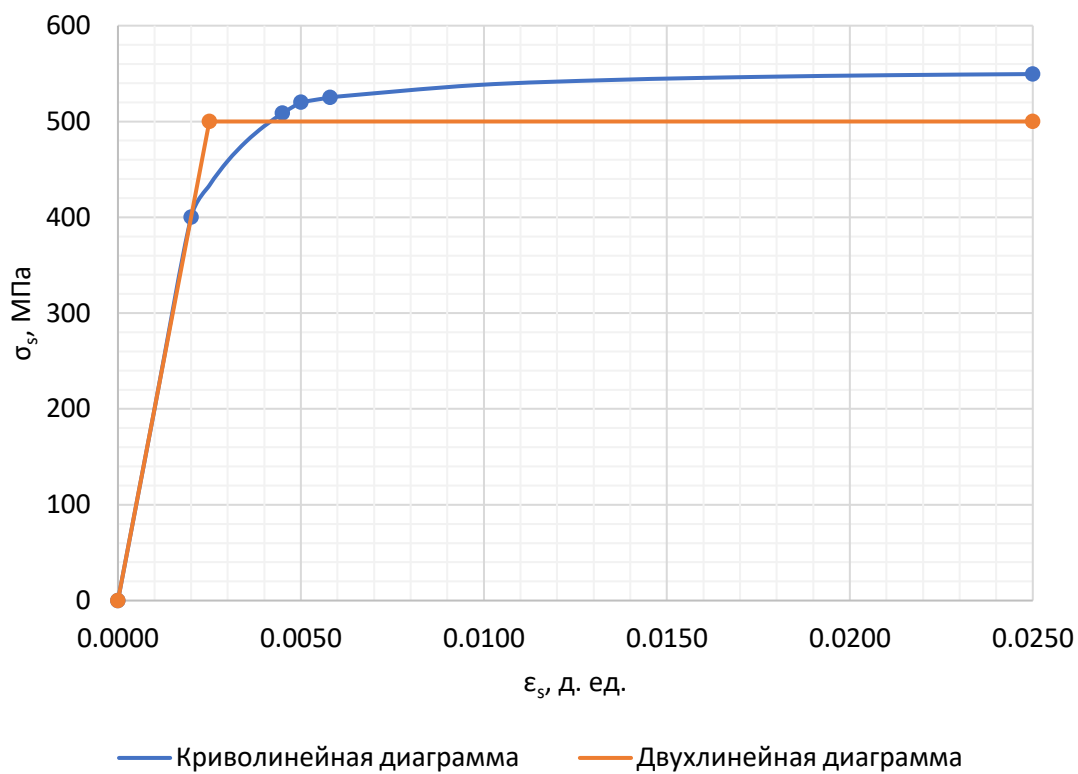
Нормативные диаграммы деформирования арматуры класса А400



Нормативные диаграммы деформирования арматуры класса А500



Нормативные диаграммы деформирования арматуры класса B500



6 Литература

1. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003 (с изменением № 1) / НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство». М.: Минстрой России, 2018.
2. Автоматизированные методы расчета массивных железобетонных конструкций при объемном напряженном состоянии: методическое пособие / ФАУ «ФЦС». М.: Минстрой России, 2019.