

Н.И. КАРПЕНКО¹, С.Н. КАРПЕНКО¹, Г.А. МОИСЕЕНКО¹¹НИИСФ РААСН, Москва, Россия

ДИАГРАММЫ ДЕФОРМИРОВАНИЯ АРМАТУРЫ ПРИ СОВМЕЩНОМ ДЕЙСТВИИ НАГРУЗОК И ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУР ДО +500°C

Аннотация. Реальные нелинейные диаграммы деформирования арматуры и бетона составляют основу современного диаграммного метода расчета железобетонных конструкций. Данный метод позволяет наиболее точно учитывать физико-механические и реологические свойства железобетона при различных режимах силового нагружения конструкций. Для распространения диаграммного метода на расчет железобетонных конструкций при совместном действии нагрузок и повышенных температур необходима существенная корректировка диаграмм деформирования арматуры и бетона. В данной статье рассматривается переход от диаграмм деформирования арматуры при нормальной температуре к диаграммам деформирования при совместном действии силовых и температурных воздействий до +500°C. При этом изменяются основные физико-механические характеристики диаграмм в зависимости от значений температуры нагрева. Рассматриваются изменения этих характеристик для двух видов арматуры – без площадки текучести и с площадкой текучести. Полученные результаты представляют основу для построения метода расчета железобетонных конструкций при совместном действии нагрузок и различных режимов нагрева.

Ключевые слова: арматура, температурные воздействия, диаграммы деформирования арматуры, арматура без площадки текучести, арматура с площадкой текучести, диаграммный метод расчета конструкций.

N.I. KARPENKO¹, S.N. KARPENKO¹, G.A. MOISEENKO¹¹ NIISF RAASN, Moscow, Russia

DIAGRAMS OF REINFORCEMENT DEFORMATION UNDER THE COMBINED ACTION OF LOADS AND ELEVATED TEMPERATURES UP TO +500 °C

Abstract. Real nonlinear diagrams of reinforcement and concrete deformation form the basis of the modern diagrammatic method for calculating reinforced concrete structures. This method allows for the most accurate consideration of the physico-mechanical and rheological properties of reinforced concrete under various modes of force loading of constructions. To extend the diagrammatic method to the calculation of reinforced concrete structures under the combined action of loads and elevated temperatures, a significant adjustment of the deformation diagrams of reinforcement and concrete is necessary. This article discusses the transition from reinforcement deformation diagrams at normal temperature to deformation diagrams under the combined action of force and temperature influences up to +500°C. At the same time, the basic physical and mechanical characteristics of the diagrams change depending on the values of the heating temperature. Changes in these characteristics are considered for two types of reinforcement – without yield point and with yield point. The results obtained provide the basis for constructing a method for calculating reinforced concrete structures under the combined action of loads and various heating modes.

Keywords: reinforcement, temperature effects, reinforcement deformation diagrams, reinforcement without yield point, reinforcement with yield point, a diagrammatic method for calculating constructions.

© Карпенко Н.И., Карпенко С.Н., Моисеенко Г.А., 2024

1. Введение

Диаграммный метод расчета железобетонных конструкций с применением нелинейной деформационной модели с высокой степенью точности отражает реальную картину деформирования конструкции при различных видах и режимах нагружения. Основу данного метода составляют обобщенные физические соотношения, связывающие кривизны элемента и его относительные деформации на уровне выбранной оси с внутренними усилиями от внешнего нагружения. Достоверность получаемых результатов достигается путем введения в расчет параметров реальных диаграмм деформирования материала под нагрузкой. В связи с этим разработка способов математического описания диаграмм деформирования бетона и арматуры при силовых и других воздействиях приобретает особую актуальность. Совместное действие повышенных температур и силового нагружения существенно влияет на характер деформирования железобетонных конструкций.

Влияние нагрева на напряженно-деформированное состояние железобетонных изгибаемых элементов исследовалось в работах [1-4] и др. Влияние воздействия повышенных температур на свойства тяжелого бетона и их учет при проектировании с использованием современных подходов рассматривались в [5-13] и других исследованиях. В работах [14-16] изучались вопросы влияния повышенных температур на модуль упругости и коэффициент температурного расширения арматурных сталей. Для учета совместного действия силового нагружения и повышенных температур в нелинейной деформационной модели необходимо откорректировать методику описания криволинейных диаграмм деформирования арматуры и бетона с учетом режима нагрева.

Целью данного исследования является разработка способа учета воздействия повышенных до $+500^{\circ}\text{C}$ температур при теоретическом описании диаграмм деформирования стальной арматуры с наличием и отсутствием физической площадки текучести.

2. Модели и методы

Диаграммы деформирования арматуры в условиях действия повышенных температур. Виды диаграмм и их характерные точки.

Исследуемые диаграммы деформирования арматуры « $\varepsilon_s(T) - \sigma_s(T)$ », связывающие относительные деформации $\varepsilon_s(T)$ с напряжениями $\sigma_s(T)$, предназначены для расчета железобетонных конструкций по нелинейной деформационной модели при совместном действии нагрузок и повышенных температур, действие которых в представленных параметрах обозначается индексом (T) . Виды рассматриваемых диаграмм представлены на рисунке 1.

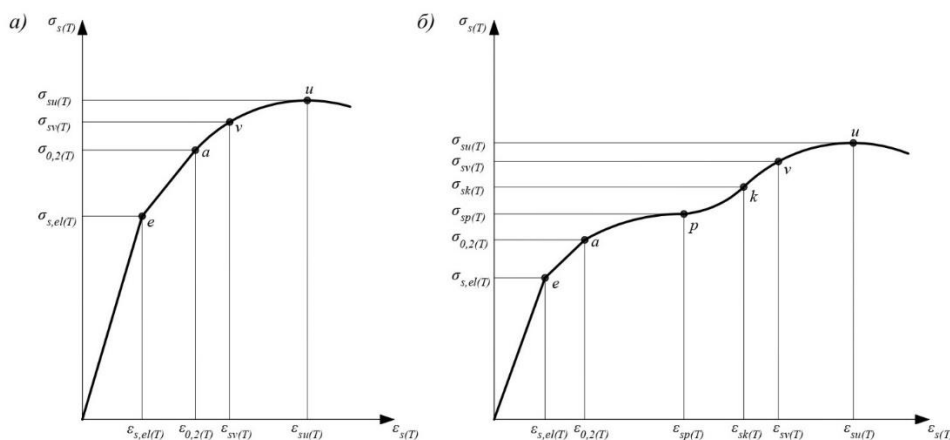


Рисунок 1 - Полные диаграммы деформирования: арматуры без физической площадки текучести (а); арматуры с физической площадкой текучести (б)

Диаграммы деформирования арматуры разделяются на два вида:

- на рисунке 1, *a* – без физической площадки текучести (согласно СП 63.13330.2018 [17] для арматуры А600–А1000, Вр500, Вр1200–1600, К1400–1700);
- на рисунке 1, *б* – с физической площадкой текучести (согласно СП 63.13330.2018 [17] для арматуры А240, А400, А500, В500).

На диаграммах (рисунок 1, а, б) выделены следующие характерные точки:

e - точка конца линейного участка диаграммы с напряжениями $\sigma_{s,el(T)}$ и деформациями (1):

$$\varepsilon_{s,el(T)} = \frac{\sigma_{s,el(T)}}{E_s(T)} \quad (1)$$

a - точка, соответствующая нелинейному отрезку диаграммы с напряжением $\sigma_{0,2(T)}$, которым соответствуют относительные деформации (2):

$$\varepsilon_{0,2(T)} = \frac{\sigma_{0,2(T)}}{E_s(T)} + 0,002 \quad (2)$$

v – точка, соответствующая предельным деформациям, при которых разрешается использование диаграммы при расчёте ответственных конструкций согласно СП 63.13330.2018 [17], для арматуры без физической площадки текучести $\varepsilon_{sv(T)} \leq 0,015$, для арматуры с физической площадкой текучести $\varepsilon_{sv(T)} \leq 0,025$;

u – точка, соответствующая разрыву арматуры с напряжениями $\sigma_{su(T)}$ и деформациями $\varepsilon_{su(T)}$; $E_s(T)$ – модуль деформации арматуры.

Величины $\varepsilon_s(T)$, $\sigma_{s,el(T)}$, $E_s(T)$, $\varepsilon_{0,2(T)}$, $\sigma_{0,2(T)}$ связываются с аналогичными величинами ε_s , $\sigma_{s,el}$, E_s , $\varepsilon_{0,2}$, $\sigma_{0,2}$ арматуры при нормальной температуре согласно [18, 19, 20] следующими соотношениями:

$$\varepsilon_{s,el(T)} = \frac{\sigma_{s,el(T)}}{E_s(T)} = \frac{\sigma_{s,el} \cdot \gamma_{st}}{E_s \cdot \beta_s}, \quad (3)$$

$$\sigma_{s,el(T)} = \sigma_{s,el} \cdot \gamma_{st}, \quad (4)$$

$$E_s(T) = E_s \cdot \beta_s, \quad (5)$$

$$\sigma_{0,2(T)} = \sigma_{0,2} \cdot \gamma_{st}, \quad (6)$$

$$\varepsilon_{0,2(T)} = \sigma_{0,2} \gamma_{st} / E_s \beta_s + 0,002, \quad (7)$$

где, параметры γ_{st} , β_s определяются по табл. 5.14 СП 27.13330.2017 [21] в зависимости от температуры нагрева; могут также использоваться результаты исследований [2].

Для диаграммы с площадкой текучести вводятся две дополнительные точки – точка *p*, соответствующая концу площадки текучести с напряжениями $\sigma_{sp(T)}$ и деформациями $\varepsilon_{sp(T)}$ и промежуточная точка *k* на ветви упрочнения с напряжениями $\sigma_{sk(T)}$ и относительными деформациями $\varepsilon_{sk(T)}$. Напряжения и недостающие относительные деформации в точках определяются по формулам:

$$\sigma_{su(T)} = \sigma_{0,2(T)} \cdot \gamma_{su}; \quad \varepsilon_{su(T)} = \varepsilon_{su} \cdot \gamma_{su}; \quad (8)$$

$$\sigma_{sp(T)} = \sigma_{0,2(T)} \cdot \gamma_{sp}; \quad \varepsilon_{sp(T)} = \varepsilon_{sp} \cdot \gamma_{sp}; \quad (9)$$

$$\sigma_{sk(T)} = \sigma_{sp(T)} + 0,2(\sigma_{su(T)} - \sigma_{sp(T)}); \quad \varepsilon_{sk(T)} = 1,2\varepsilon_{sp(T)}; \quad (10)$$

Коэффициенты $\gamma_{s,el}$, γ_{sp} , γ_{su} , а также относительные деформации ε_{sp} , ε_{su} соответствующие данным напряжениям, приведены в таблице 1 и таблице 2.

Таблица 1 – Характеристики арматуры с условным пределом текучести

Класс арматуры	Номинальный диаметр арматуры в мм	$\gamma_{s,el}$	γ_{su}	ε_{su}
A600	10-40	0,7	1,35	0,06
A800	10-32	0,7	1,28	0,07
A1000	10-32	0,7	1,23	0,06
Bp500	3-5	0,7	1,08	0,025
Bp1200	8	0,85	1,05	0,04
Bp1300	7	0,85	1,05	0,04
Bp1400	4-6	0,85	1,1	0,05
Bp1500	3	0,85	1,2	0,06
Bp1600	3-5	0,85	1,2	0,06
K1400	15	0,8	1,07	0,05
K1500	6-18	0,8	1,07	0,05
K1600	6, 9, 11, 12, 15	0,8	1,07	0,05
K1700	6-9	0,8	1,07	0,05

Таблица 2 – Характеристики арматуры с физическим пределом текучести

Класс арматуры	Номинальный диаметр арматуры в мм	$\gamma_{s,el}$	γ_{sp}	ε_{sp}	γ_{su}	ε_{su}
A240	6-40	0,97	1,01	0,015	2,0	0,19
A400	6-40	0,9	1,05	0,012	1,45	0,14
A500	10-40	0,85	1,07	0,008	1,3	0,10
B500	3-16	0,8	1,04	0,005	1,1	0,03

Нормативная диаграмма деформирования арматуры без физической площадки текучести

Диаграмма разделяется на два участка: линейный от $\sigma_s = 0$ до $\sigma_s = \sigma_{s,el(T)}$ и нелинейный от $\sigma_s = \sigma_{s,el(T)}$ до $\sigma_s = \sigma_{su(T)}$.

Нормативная диаграмма используется при расчёте конструкций по второй группе предельных состояний. При этом:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{0,2(T)} &= R_{s,ser} \gamma_{st} \\ \sigma_{s,el(T)} &= \sigma_{0,2(T)} \gamma_{s,el} = R_{s,ser} \gamma_{st} \gamma_{s,el} \\ \sigma_{su(T)} &= \sigma_{0,2(T)} \gamma_{su} = R_{s,ser} \gamma_{st} \gamma_{su} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

где значения $\gamma_{s,el}$ и γ_{su} определяются по таблице 1.

На линейном отрезке (при $\sigma_{s(T)} \leq \sigma_{s,el(T)}$)

$$\varepsilon_{s(T)} = \frac{\sigma_{s(T)}}{E_{s(T)}} \quad (12)$$

где $E_{s(T)}$ – модуль упругости арматуры в условиях нагрева.

На нелинейном отрезке (при $\sigma_{s(T)} \geq \sigma_{s,el(T)}$)

$$\varepsilon_{s(T)} = \frac{\sigma_{s(T)}}{\nu_s E_{s(T)}} \quad (13)$$

где ν_s – коэффициент изменения секущего модуля арматуры:

$$v_s = \hat{v}_s + (v_0 - \hat{v}_s) \sqrt{1 - \omega\eta - (1 - \omega)\eta^2}, \quad (14)$$

здесь $\hat{v}_s$ – коэффициент изменения секущего модуля в вершине диаграммы (при $\sigma_{s(T)} = \sigma_{su(T)}$),

ω – коэффициент, характеризующий кривизну диаграммы,

η – уровень приращения напряжений,

v_0 – коэффициент секущего модуля в начале диаграммы:

$$v_0 = 1 \quad (15)$$

$$\hat{v}_s = \frac{\sigma_{su(T)}}{E_{s(T)} \varepsilon_{su(T)}}, \quad (16)$$

$$\eta = \frac{\sigma_{s(T)} - \sigma_{s,el(T)}}{\sigma_{su(T)} - \sigma_{s,el(T)}} \text{ (при } \sigma_{s(T)} = \sigma_{su(T}), \eta = 1), \quad (17)$$

$$2 \geq \omega = \frac{(v_0 - \hat{v}_s)^2 (\eta_{0,2} - 1) + (v_{0,2} - \hat{v}_s)^2}{\eta_{0,2} (\eta_{0,2} - 1) (v_0 - \hat{v}_s)^2} \quad (18)$$

$\eta_{0,2}$ – уровень напряжений при $\sigma_{s(T)} = \sigma_{0,2(T)}$; $v_{0,2}$ – коэффициент секущего модуля при $\sigma_{s(T)} = \sigma_{0,2(T)}$:

$$\eta_{0,2} = \frac{\sigma_{0,2(T)} - \sigma_{s,el(T)}}{\sigma_{su(T)} - \sigma_{s,el(T)}}; \quad v_{0,2} = \frac{\sigma_{0,2(T)}}{\sigma_{0,2(T)} + 0,002 E_{s(T)}}. \quad (19)$$

Если оказывается, что вычисленные по формуле (18) значения $\omega > 2$, то зависимость (19) становится справедливой только до уровней $\eta \leq \bar{\eta}$, где

$$\bar{\eta} = 0,92(\omega - 1) \quad (20)$$

от $\bar{\eta}$ до $\eta = 1$ используется линейный участок диаграммы.

Коэффициент изменения секущего модуля также может определяться через уровень деформаций $\eta_d = \varepsilon_{s(T)} / \varepsilon_{su(T)}$ из решения квадратного уравнения:

$$\begin{aligned} Av_s^2 + Bv_s + C &= 0; \\ A &= 1 + \frac{(1 - \omega)(v_0 - \hat{v}_s)^2 \eta_d^2 \sigma_{su(T)}^2}{\hat{v}_s^2 (\sigma_{su(T)} - \sigma_{s,el(T)})^2}; \\ B &= 2\hat{v}_s - \frac{\eta_d (v_0 - \hat{v}_s)^2 \sigma_{su(T)}}{\hat{v}_s (\sigma_{su(T)} - \sigma_{s,el(T)})} \left(\omega - \frac{2(1 - \omega)\sigma_{s,el(T)}}{\sigma_{su(T)} - \sigma_{s,el(T)}} \right); \\ C &= \hat{v}_s^2 - (v_0 - \hat{v}_s)^2 \left[1 + \frac{\omega \sigma_{s,el(T)}}{\sigma_{su(T)} - \sigma_{s,el(T)}} - \frac{(1 - \omega)\sigma_{s,el(T)}^2}{(\sigma_{su(T)} - \sigma_{s,el(T)})^2} \right]; \end{aligned} \quad (21)$$

при решении уравнения (21) перед квадратным корнем принимается знак плюс.

Нормативная диаграмма деформирования арматуры с физической площадкой текучести.

Линейный участок диаграммы описывается формулой (1). В диаграмму включается два нелинейных отрезка (рисунок 1 б):

- 1) от точки e (конца линейного участка) до точки p (конца площадки текучести);
- 2) от точки p до точки u (соответствующей разрыву арматуры).

Для описания первого нелинейного отрезка используются формулы (13) – (20), где $\sigma_{su(T)}$ заменяется $\sigma_{sp(T)}$, $\varepsilon_{su(T)}$ на $\varepsilon_{sp(T)}$; $\sigma_{sp(T)}$ определяется по формуле (9), а значение $\varepsilon_{sp(T)}$ определяется по формуле (9) и таблице 2.

Для описания второго нелинейного участка – участка упрочнения арматуры – также используются формулы (13) – (21), в которых следует заменить

$$\eta_{0,2} \text{ на } \eta_{sk} = (\sigma_{sk(T)} - \sigma_{sp(T)}) / (\sigma_{su(T)} - \sigma_{sp(T)});$$

$$\nu_{0,2} \text{ на } \nu_{sk} = \sigma_{sk(T)} / E_{s(T)} \varepsilon_{sk(T)}; \quad (22)$$

$\sigma_{s,el(T)}$ на $\sigma_{sp(T)}$
и принять

$$\nu_0 = \sigma_{sp(T)} / E_{s(T)} \varepsilon_{sp(T)};$$

$$\eta = (\sigma_{s(T)} - \sigma_{sp(T)}) / (\sigma_{su(T)} - \sigma_{sp(T)}); \quad (23)$$

где значения $\sigma_{su(T)}$, $\sigma_{sp(T)}$, $\sigma_{sk(T)}$, $\varepsilon_{sk(T)}$ определяются по формулам (8) – (10).

Расчётная диаграмма для арматуры.

Эта диаграмма используется для расчёта конструкций по первой группе предельных состояний. Она описывается зависимостями (1) – (23), где следует принимать

$$\sigma_{0,2(T)} = R_{s(T)} = R_s \cdot \gamma_{st} \quad (24)$$

Относительные деформации $\varepsilon_{su(T)}$, $\varepsilon_{sp(T)}$, а также переходные коэффициенты $\gamma_{s,el}$, γ_{sp} , γ_{su} , представленные в таблице 1, таблице 2, остаются без изменения. Согласно СП 63.13330.2018 [17], при расчёте ответственных конструкций диаграмму без физической площадки текучести разрешается использовать до $\varepsilon_{s(T)} \leq 0,015$, а для арматуры с физической площадкой текучести $\varepsilon_{s(T)} \leq 0,025$. После этого арматура исключается из расчёта.

Напряжения в арматуре, соответствующие $\varepsilon_{s(T)} = 0,015$, $\varepsilon_{s(T)} = 0,025$, представляется в виде $R_s \cdot \gamma_{s2} \gamma_{st}$, где γ_{s2} – коэффициент увеличения прочности. При этом разрешается принимать $\gamma_{s2} \leq 1,1$.

Общие деформации арматуры.

Общие деформации арматуры состоят из двух составляющих. Первая составляющая, рассмотренная в п. 1-4, связана с напряжениями в арматуре, вторая составляющая – с температурными деформациями. В результате общие деформации арматуры будут равны

$$\bar{\varepsilon}_{s(T)} = \varepsilon_{s(T)} + \alpha_{st} t_s \quad (25)$$

где α_{st} – коэффициент температурного расширения арматуры, принимаемые по таблице 5.14 СП 27.13330.2017 [21], t – температура нагрева арматуры, $\varepsilon_{s(T)}$ – относительные силовые деформации, принимаемые по формулам п. 1-4.

Диаграммы деформирования арматуры в элементах с трещинами без учета температурных деформаций.

Используются два вида диаграмм. Первая диаграмма связывает напряжения $\sigma_{sc(T)}$ с относительными деформациями $\varepsilon_{s(T)}$ в трещине, она записывается как для свободной арматуры по указаниям пунктов 1 – 2.

Вторая диаграмма связывает напряжения в арматуре в трещине $\sigma_{s(T)}$ со средними деформациями $\varepsilon_{sm(T)}$ арматуры на участках между трещинами, которые из-за влияния сцепления арматуры с бетоном на участках между трещинами оказываются меньше деформаций ε_s свободной арматуры. Средняя диаграмма имеет два участка. Первый участок (при $\sigma_{s(T)} \leq \sigma_{s,el(T)}$) соответствует линейной стадии деформирования арматуры в трещинах. На этом участке

$$\varepsilon_{sm(T)} = \sigma_{s(T)} \psi_{s(T)} / E_{s(T)} = \sigma_{s(T)} / E_{s(T)} \nu_{sm(T)} \quad (26)$$

где $\psi_{s(T)}$ – коэффициент, учитывающий работу растянутого бетона на участках с трещинами;

$$\nu_{sm(T)} = 1 / \psi_{s(T)}, \quad (27)$$

Коэффициент $\psi_{s(T)}$ определяется по формулам:

$$\psi_{s(T)} = 1 - 0,75 \varphi_{st} \frac{\sigma_{crc(T)}}{\sigma_{s(T)}} \quad (28)$$

или

$$\psi_{s(T)} = \frac{1 - 0,75\varphi_{sl}}{1 - 0,75\varphi_{sl}\left(1 - \frac{\varepsilon_{crc(T)}}{\varepsilon_s(T)}\right)}, \quad (29)$$

где, $\sigma_{crc(T)}$ – напряжения в арматуре в трещине в момент трещинообразования (в момент после образования трещины); $\sigma_{s(T)}$ – текущее напряжение в арматуре в трещинах; $\varepsilon_{crc(T)}$ – относительные деформации арматуры в трещине в момент трещинообразования; $\varepsilon_{s(T)}$ – текущие относительные деформации арматуры в трещине; $\varphi_{sl} = 1$ – при кратковременном действии напряжений, $\varphi_{sl} = 0,8$ – при длительном действии напряжений.

Второй участок диаграммы (при $\sigma_{s(T)} > \sigma_{s,el}$) представляется в виде:

$$\varepsilon_{sm(T)} = \sigma_{s(T)}\psi_{s(T)}/E_{s(T)}\nu_{s(T)} = \sigma_{s(T)}/E_{s(T)}\nu_{sm(T)}, \quad (30)$$

где параметр $\nu_{s(T)}$ секущего модуля определяется по указаниям пунктов 1-4,

$$\nu_{sm(T)} = \nu_{s(T)}/\psi_{s(T)} \quad (31)$$

Параметр $\psi_{s(T)}$, входящий в формулу (31), определяется по формуле (28).

Средние относительные деформации арматуры на участке между трещинами с учетом влияния температурных деформаций арматуры и бетона на участках между трещинами.

Полные средние относительные деформации арматуры составят:

$$\bar{\varepsilon}_{s(T)} = \varepsilon_{sm(T)} + [\alpha_{st} - \alpha_{bt}(1 - \psi_{s(T)})]t_s, \quad (32)$$

где, α_{st}, α_{bt} – коэффициенты температурных деформаций арматуры и бетона t_s .

Относительные деформации $\bar{\varepsilon}_{s(T)}$ могут использоваться для определения ширины раскрытия трещин a_{cn} :

$$a_{cn} = \bar{\varepsilon}_{s(T)}l_s, \quad (33)$$

где, l_s – расстояние между трещинами, определяемое согласно рекомендациям [19, 20].

На рисунке 2 представлены теоретические диаграммы деформирования арматуры A800 при температурах нагрева $t_s = 50^\circ\text{C}, 300^\circ\text{C}, 400^\circ\text{C}$ и 500°C , полученные согласно описанной методике.

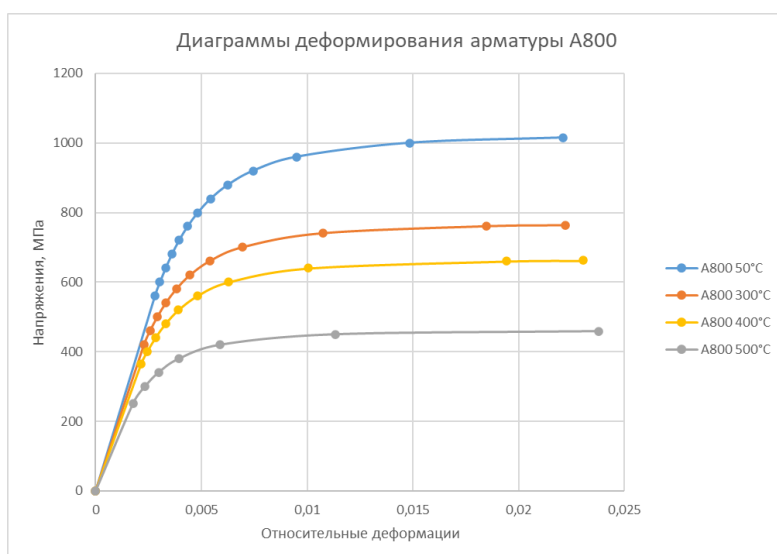


Рисунок 2 – Диаграммы деформирования арматуры A800 при совместном действии нагрузки и повышенных температур

На рисунке 3 представлены теоретические диаграммы деформирования арматуры A500 при температурах нагрева $t_s = 50^\circ\text{C}$, 300°C , 400°C и 500°C .

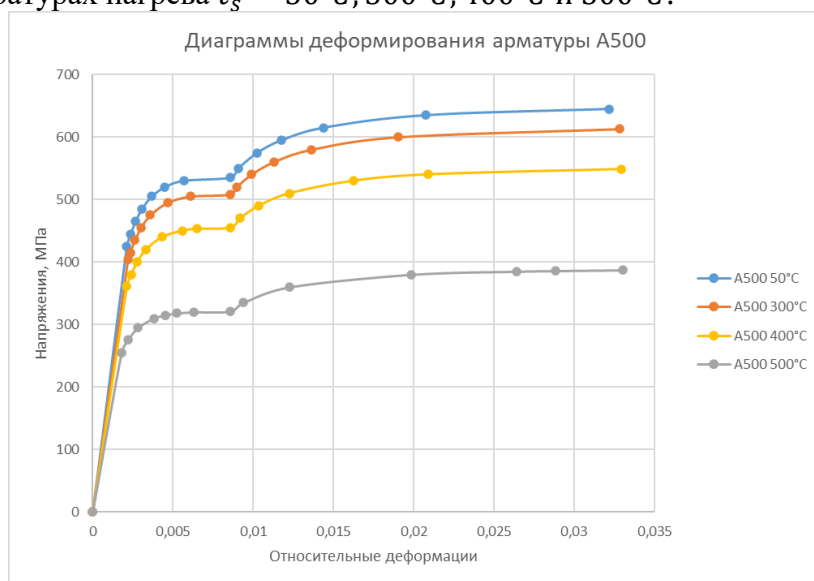


Рисунок 3 – Диаграммы деформирования арматуры A500 при совместном действии нагрузки и повышенных температур

4.Выводы

1. Рассмотрены все виды диаграмм деформирования арматуры в условиях действия нагрузок и повышенных температур.
2. Предложенные способы описания диаграмм деформирования арматуры могут быть использованы при расчете железобетонных конструкций по нелинейной деформационной модели при совместном действии силового нагружения и различных режимов нагрева.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Корсун В.И. Развитие методов расчета железобетонных конструкций зданий и сооружений на температурно-влажностные воздействия // Современное промышленное и гражданское строительство. 2021. Т. 17. № 1. С. 29-40.
2. Корсун В.И., Кхон Кхемарак, Ха Ван Куинь. Температурные моменты в статически неопределимых балках из высокопрочного бетона при одностороннем нагреве // В сборнике: Неделя науки ИСИ. Материалы всероссийской конференции в 3-х частях. Инженерно-строительный институт Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. Санкт-Петербург, 2021. С. 382- 384.
3. Rehman A., Masood A., Akhtar S., Ibrahim S.M., Shariq M. Experimental and numerical investigation into flexural bond strength of RC beams exposed to elevated temperature // Construction and Building Materials. 2021. (282). С. 122630.
4. Liu Jin, Renbo Zhang, Liang Li, Xiuli Du, Yunlong Yao. Impact behavior of SFRC beams at elevated temperatures: Experimental and analytical studies // Engineering Structures. 2019. (197). С. 109401. DOI:10.1016/j.engstruct.2019.109401.
5. Кхон Кхемарак, Корсун В.И., Ха Ван Куинь, Волков А.С. Влияние кратковременного нагрева до $+90^\circ\text{C}$ на деформацию и прочность высокопрочного бетона // Под ред. Б. Анатолийса, В. Николая, С. Виталия, Springer Nature Switzerland AG, 2020. С. 585-592. [Khemarak Khon, Vladimir Korsun, Quynh Ha, and Andrey Volkov. Effect of Short-Term Heating up to $+90^\circ\text{C}$ on Deformation and Strength 137 of High-Strength Concrete // Под ред. В. Анатолийса, В. Николая, С. Виталия, Springer Nature Switzerland AG, 2020. С. 585-592]. DOI: 10.1007/978-3-030-42351-3_51.
6. Корсун В.И., Баранов А.О., Кхон Кхемарак, Ха Ван Куинь. Влияние температуры и продолжительности нагрева на свойства высокопрочного бетона, модифицированного органоминеральными компонентами // Под ред. Н. Ватина, А. Бородина, Б. Тельтаева, Чам: Springer Nature Switzerland AG, 2021. С.

515-524. [Vladimir Korsun, Aleksey Baranov, Khemarak Khon, and Quynh Ha. The Influence of Temperature and Duration of Heating on the Properties of High-Strength Concrete Modified by Organo-Mineral Components // Под ред. N. Vatin, A. Borodinecs, B. Teltayev, Cham: Springer Nature Switzerland AG, 2021. С. 515-524]. https://doi.org/10.1007/978-3-030-72404-7_50.

7. Корсун В.И., Кхон Кхемарак, Ха Ван Куинь, Баранов А.О. Прочность и деформации высокопрочного бетона при кратковременном нагреве до $+90^{\circ}\text{C}$ // Серия конференций IOP: Материаловедение и инженерия. 2020. (896). С. 012035. [Korsun V.I., Khon K., Ha V.Q., and Baranov A.O. Strength and deformations of highstrength concrete under short-term heating conditions up to $+90^{\circ}\text{C}$ // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. (896). С. 012035]. DOI: 10.1088/1757-899X/896/1/012035.

8. Korsun V., Korsun A., Volkov A. Characteristics of mechanical and rheological properties of concrete under heating conditions up to 200°C // MATEC Web of Conferences. 2013. (6). С. 1-8.

9. Korsun V., Shvets G. The calculation of creep deformation of high-strength concrete in relation to the conditions of exposure to elevated temperatures // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. (896). С. 012039. DOI: 10.1088/1757-899X/896/1/012039.

10. Mustafa M.A., Yusof K.M. Mechanical properties of hardened concrete in hothumid climate // Cement and Concrete Research. 1991. № 4 (21). С. 601-613.

11. Mohd Zain M.F., Radin S.S. Physical properties of high-performance concrete with admixtures exposed to a medium temperature range 20°C to 50°C // Cement and Concrete Research. 2000. (30). С. 1283-1287.

12. Samir N.S. [и др.]. Effect of moisture and temperature on the mechanical properties of concrete // Construction and Building Materials. 2011. (25). С. 688-696.

13. Корсун В.И., Баранов А.О. Расчёт температурно-усадочных деформаций высокопрочных бетонов применительно к условиям воздействия повышенных температур // Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования Российской академии архитектуры и строительных наук по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2019 году: Сб. науч. тр. РААСН. М.: Издательство АСВ, 2020. С. 314-321.

14. Кричевский А.П. Расчет железобетонных инженерных сооружений на температурные воздействия. М., Стройиздат СССР, 1984.

15. Мадатян С.А. Арматура железобетонных конструкций. ООО «Воентехмет», М., 2000.

16. Милованов А.Ф., Тупов Н.И. Ползучесть и релаксация напряжений в бетоне зрелого возраста при длительном действии повышенных температур до 90°C . // Ползучесть и усадка бетона. Материалы совещания, подготовленные НИИЖБ Госстроя СССР. ЦИНИС, М., 1969.

17. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. М., Стандартинформ, 2019.

18. Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона / Н.И. Карпенко. – Москва: Стройиздат, 1996. – 416 с.

19. Карпенко Н.И. Методическое пособие «Статически неопределимые железобетонные конструкции. Диаграммные методы автоматизированного расчета и проектирования» ФАУ "Федеральный центр нормирования, стандартизации и оценки соответствия в строительстве". Москва, 2017, рук. работы Н.И. Карпенко.

20. Карпенко Н.И. Методическое пособие «Автоматизированные методы расчета массивных железобетонных конструкций при объемном напряженном состоянии» ФАУ "Федеральный центр нормирования, стандартизации и оценки соответствия в строительстве". Москва, 2019, рук. работы Н.И. Карпенко, стр. 29-36.

21. СП 27.13330.2017. Бетонные и железобетонные конструкции, предназначенные для работы в условиях воздействия повышенных и высоких температур. М., 2017.

REFERENCES

1. Korsun V.I. Development of methods for calculating reinforced concrete structures of buildings and structures for temperature and humidity effects. *Modern industrial and civil engineering*. 2021. Vol. 17. No. 1. Pp. 29-40.

2. Korsun V.I., Khon Khemarak, Ha Van Quynh. Temperature moments in statically indeterminate beams made of high-strength concrete with one-sided heating. [In the collection: Science Week of ISI. Proceedings of the All-Russian Conference in 3 parts.] *Civil Engineering Institute of Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. Saint Petersburg*, 2021. P. 382-384.

3. Rehman A., Masood A., Akhtar S., Ibrahim S.M., Shariq M. Experimental and numerical investigation into flexural bond strength of RC beams exposed to elevated temperature. *Construction and Building Materials*. 2021. (282). С. 122630.

4. Liu Jin, Renbo Zhang, Liang Li, Xiuli Du, Yunlong Yao. Impact behavior of SFRC beams at elevated temperatures: Experimental and analytical studies. *Engineering Structures*. 2019. (197). P. 109401. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.109401.
5. Khon Khemarak, Korsun V.I., Ha Van Quynh, Volkov A.S. Effect of Short-Term Heating up to +90°C on Deformation and Strength of High-Strength Concrete. Ed. B. Anatolijs, V. Nikolai, S. Vitalii, Springer Nature Switzerland AG, 2020. P. 585-592. DOI: 10.1007/978-3-030-42351-3_51
6. Korsun V.I., Baranov A.O., Khon Khemarak, Ha Van Quynh. [Vladimir Korsun, Aleksey Baranov, Khemarak Khon, and Quynh Ha. The Influence of Temperature and Duration of Heating on the Properties of High-Strength Concrete Modified by Organo-Mineral Components .Ed. N. Vatin, A. Borodinecs, B. Teltayev, Cham: Springer Nature Switzerland AG, 2021. P. 515-524. https://doi.org/10.1007/978-3-030-72404-7_50
7. Korsun V.I., Khon Khemarak, Ha Van Quynh, Baranov A.O. Strength and deformations of highstrength concrete under short-term heating conditions up to + 90°C. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. (896). P. 012035. DOI: 10.1088/1757- 899X/896/1/012035
8. Korsun V., Korsun A., Volkov A. Characteristics of mechanical and rheological properties of concrete under heating conditions up to 200°C. *MATEC Web of Conferences*. 2013. (6). P. 1-8.
9. Korsun V., Shvets G. The calculation of creep deformation of high-strength concrete in relation to the conditions of exposure to elevated temperatures. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. (896). C. 012039. DOI: 10.1088/1757-899X/896/1/012039
10. Mustafa M.A., Yusof K.M. Mechanical properties of hardened concrete in hot humid climate. *Cement and Concrete Research*. 1991. No. 4 (21). C. 601-613.
11. Mohd Zain M.F., Radin S.S. Physical properties of high-performance concrete with admixtures exposed to a medium temperature range of 20°C to 50°C. *Cement and Concrete Research*. 2000. (30). C. 1283-1287.
12. Samir N.S. [and etc.]. Effect of moisture and temperature on the mechanical properties of concrete. *Construction and Building Materials*. 2011. (25). C. 688-696.
13. Korsun V.I., Baranov A.O. Calculation of temperature-shrinkage deformations of high-strength concretes in relation to conditions of exposure to elevated temperatures [Fundamental, exploratory and applied research of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences on scientific support for the development of architecture, urban planning and the construction industry of the Russian Federation in 2019: Coll. scientific. tr. RAASN. Moscow]: ASV Publishing House, 2020. Pp. 314-321.
14. Krichevsky A.P. Calculation of reinforced concrete engineering structures for temperature effects. Moscow, Stroyizdat USSR, 1984.
15. Madatyan S.A. Reinforcement of reinforced concrete structures. ООО Voentekhmet, Moscow, 2000.
16. Milovanov A.F., Tupov N.I. Creep and stress relaxation in mature concrete under long-term exposure to elevated temperatures up to 90 °C. Creep and shrinkage of concrete. Proceedings of the meeting prepared by the Research Institute of Reinforced Concrete of the USSR Gosstroy. TSINIS, Moscow, 1969.
17. SP 63.13330.2018. Concrete and reinforced concrete structures. Basic provisions. Moscow, Standartinform, 2019.
18. Karpenko N.I. General models of reinforced concrete mechanics / N.I. Karpenko. - Moscow: Stroyizdat, 1996. - 416 p.
19. Karpenko N.I. Methodological manual "Statically indeterminate reinforced concrete structures. Diagrammatic methods of automated calculation and design" FAU "Federal Center for Normation, Standardization and Conformity Assessment in Construction". Moscow, 2017, supervised by N.I. Karpenko.
20. Karpenko N.I. Methodological manual "Automated methods for calculating massive reinforced concrete structures under volumetric stress state" FAU "Federal Center for Normation, Standardization and Conformity Assessment in Construction". Moscow, 2019, supervised by N.I. Karpenko, pp. 29-36.
21. SP 27.13330.2017. Concrete and reinforced concrete structures designed to work under conditions of elevated and high temperatures. M., 2017.

Информация об авторах

Карпенко Николай Иванович

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук», г. Москва, Россия,
Академик РААСН, д-р техн. наук, проф., главный научный сотрудник лаборатории «Проблемы прочности и качества в строительстве»
E-mail: niisf_lab9n@mail.ru

Карпенко Сергей Николаевич

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук», г. Москва, Россия,
д-р техн. наук
E-mail: niisf_lab9n@mail.ru

Моисеенко Георгий Александрович

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук», г. Москва, Россия,
канд. техн. наук, научный сотрудник лаборатории «Проблемы прочности и качества в строительстве»
E-mail: gecklock@yandex.ru

Information about authors

Karpenko Nikolay Iv.

Federal State Budgetary Institution "Research Institute of Construction Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences", Moscow, Russia,
Full member of RAACS, doctor in tech. sc., Prof., Chief Researcher of the Laboratory "Problems of Strength and Quality in Construction"
E-mail: niisf_lab9n@mail.ru

Karpenko Sergey N.

Federal State Budgetary Institution "Research Institute of Construction Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences", Moscow, Russia,
doctor in tech. sc.
E-mail: niisf_lab9n@mail.ru

Moiseenko Georgy A.

Federal State Budgetary Institution "Research Institute of Construction Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences", Moscow, Russia,
candidate in tech. sc., research fellow at the laboratory "Problems of Strength and Quality in Construction"
E-mail: gecklock@yandex.ru