

DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-11-41-48

Никулина Ю.А.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

E-mail: naiklins@yandex.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЕННЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК ТРАПЕЦИЕВИДНОГО ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ

Аннотация. Балки трапециевидного поперечного сечения с верхней широкой гранью с предварительно напряженной арматурой совмещают в себе положительные качества по прочности, трещиностойкости, деформативности и ресурсосбережению, что позволяет перекрывать с их помощью значительные пролеты многоэтажных зданий.

Для разработки методики расчета момента трещинообразования в этих конструкциях принята нелинейная деформационная модель, в состав которой входят уравнения равновесия, условия линейного распределения относительных деформаций по высоте сечения элемента и уточненные диаграммы деформирования бетона и арматуры. Диаграммы состояния бетона приняты нелинейными без ниспадающей ветви. Для описания диаграмм деформирования высокопрочной и обычной арматуры принята универсальная зависимость, состоящая из одного линейного и двух нелинейных уравнений, в которой расчет отдельных параметров производится по различным формулам. Для начальной стадии процесса трещинообразования представлена расчетная схема, в соответствии с которой составлены необходимые уравнения и соотношения применительно к рассматриваемой предварительно напряженной железобетонной балке трапециевидного поперечного сечения.

Целью исследования, помимо разработки методики расчета, была также разработка алгоритма и программы расчета для ЭВМ. Для получения и анализа результатов, был проведен численный эксперимент, результаты которого представлены в табличной форме. Полученная методика расчета не содержит эмпирических коэффициентов, в связи с этим данную методику, а соответственно, и программу для ЭВМ возможно использовать для любых классов бетона и арматуры.

Ключевые слова: предварительно напряженная арматура, железобетонная балка, трапециевидное сечение, трещиностойкость, численный эксперимент.

Введение. Балки трапециевидного поперечного сечения с верхней широкой гранью совмещают в себе положительные качества по несущей способности и ресурсосбережению. Экономия бетона в таких балках, в сравнении с балками прямоугольного поперечного сечения, составляет от 15 до 45 %. В настоящее время отсутствуют исследования, посвященные предварительно напряженным балкам трапециевидного сечения, которыми можно перекрывать значительные пролеты зданий [1], однако, по отдельности вопросы, связанные с работой предварительно напряженных железобетонных конструкций под нагрузками [2–6], в том числе мгновенными [7] и циклическими [8], исследованием прочности и трещиностойкости изгибаемых железобетонных элементов трапециевидного сечения без предварительного напряжения [9–11], являются актуальными и интересными с точки зрения применения данных исследований в практике проектирования.

В связи с этим в данной работе для железобетонных балок трапециевидного поперечного сечения с предварительно напряженной арматурой представлена методика расчета момента трещинообразования. Размещение предварительно

напряженной арматуры предполагается в растянутой зоне бетона для наиболее эффективной работы. Основу методики составляет нелинейная деформационная расчетная модель [12, 13], главным элементом которой являются уточненные диаграммы деформирования бетона и арматуры [14–16].

Материалы и методы. На рис. 1 показаны диаграммы деформирования бетона при неоднородном сжатии и растяжении, которые принимаются без ниспадающей ветви [17, 18], и представлены следующие основные параметры, необходимые для дальнейших расчетов: начальный модуль упругости E_{b2} , предельное сопротивление сжатию R_b и растяжению R_{bt} , а также предельные относительные деформации ϵ_{bu} и ϵ_{btu} .

Также для изложенной далее методики расчета применяются диаграммы растяжения высокопрочной и обычной арматуры. Высокопрочная арматура, иначе говоря, арматура без физической площадки текучести, будет применяться в элементе только в качестве арматуры с предварительным напряжением. Обычная арматура (с физической площадкой текучести) будет располагаться как в растянутой, так и сжатой зоне сечения, и является конструктивной, ее основное предназначение заключается в формировании

объемного каркаса образца, объединении продольной и поперечной арматуры в единую систему, что повышает прочность рассматриваемой балки. Особенностью работы изгибаемых элементов с предварительно напряженной арматурой в растянутой зоне является то, что на начальной стадии нагружения такого элемента наблюдается обратная работа обычной продольной арматуры, то есть арматура в нижней зоне сечения

сжата, а в верхней – растянута. В связи с тем, что у элементов трапециевидного сечения размеры верхней и нижней граней отличаются, то наличие в их нижней зоне обычной продольной арматуры играет положительную роль. Данное явление учтено в изложенной далее методике расчета трещиностойкости. Диаграммы растяжения арматуры представлены на рис. 2 [18].

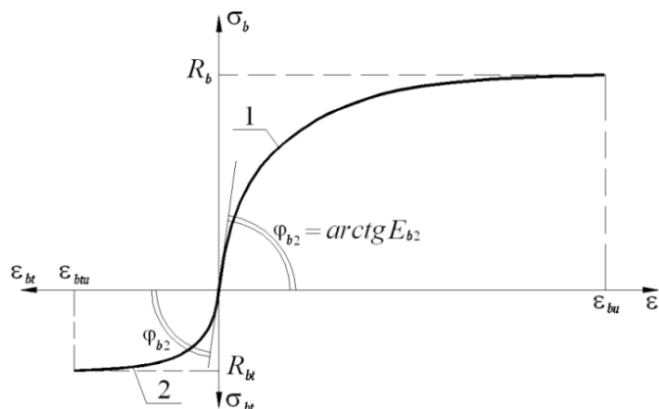


Рис. 1. Диаграммы неоднородного сжатия (1) и растяжения (2) бетона [14]

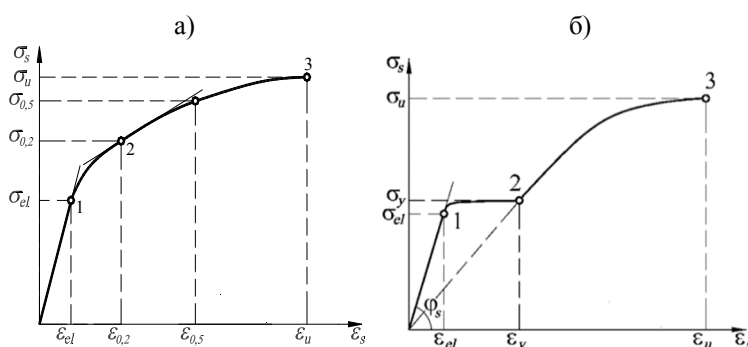


Рис. 2. Диаграмма растяжения арматуры [18]:

а – высокопрочная; б – обычная; 1 – линейный предел упругости; 2 – предел текучести (в случае с высокопрочной арматурой – условный предел текучести); 3 – предел прочности

Аналитическое описание диаграмм сжатия и растяжения бетона, а также диаграмм растяжения обычной арматуры представлено в работах [17, 18]. Уравнения, которые описывают процесс растяжения высокопрочной арматуры, аналогичны аналитическому описанию обычной арматуры, но с заменой параметров σ_y и ϵ_y на $\sigma_{0,2}$ и $\epsilon_{0,2}$.

Основная часть. Расчетная схема рассматриваемой железобетонной балки для начальной стадии процесса трещинообразования, а именно, в момент перед образованием первой трещины, представлена на рис. 3. Формулы 1, 2 отображают уравнения равновесия для изгибаемого железобетонного элемента трапециевидного поперечного сечения с предварительно напряженной арматурой в растянутой зоне.

$$0,5(b_{up} + b_x)x_c \omega_c \sigma_{bc} + \sigma_{sc} A_{sc} - 0,5(b_x + b_{dn})x_t \omega_{tu} R_{bt} - \sigma_{st} A_{st} - (\sigma_{sp} + \Delta\sigma_{sp}) A_{sp} = 0, \tag{1}$$

$$M_{crc} = 0,5(b_{up} + b_x)x_c^2 \omega_c \gamma_c \sigma_{bc} + \sigma_{sc} A_{sc} (x_c - a_c) + 0,5(b_x + b_{dn})x_t^2 \omega_{tu} \gamma_{tu} R_{bt} + \sigma_{st} A_{st} (h - x_c - a_t) + (\sigma_{sp} + \Delta\sigma_{sp}) A_{sp} (h - x_c - a_p), \tag{2}$$

где M_{crc} – момент появления первой трещины в сечении; b_x – ширина той плоскости поперечного сечения изгибаемого элемента, по которой проходит нейтральная ось непосредственно перед исчерпанием прочности нормального сечения

элемента; ω_c, ω_{tu} – геометрические параметры эпюр напряжений.

Обозначения остальных параметров ($\gamma_c, \gamma_{tu}, \sigma_{bc}, R_{bt}, x_c, x_t, \sigma_{sc}, \sigma_{st}, \sigma_{sp}, \Delta\sigma_{sp}, A_{sp}, A_{sc}, A_{st}, a_p, a_c, a_t, h, b_{up}, b_{dn}$) понятны из рис. 3.

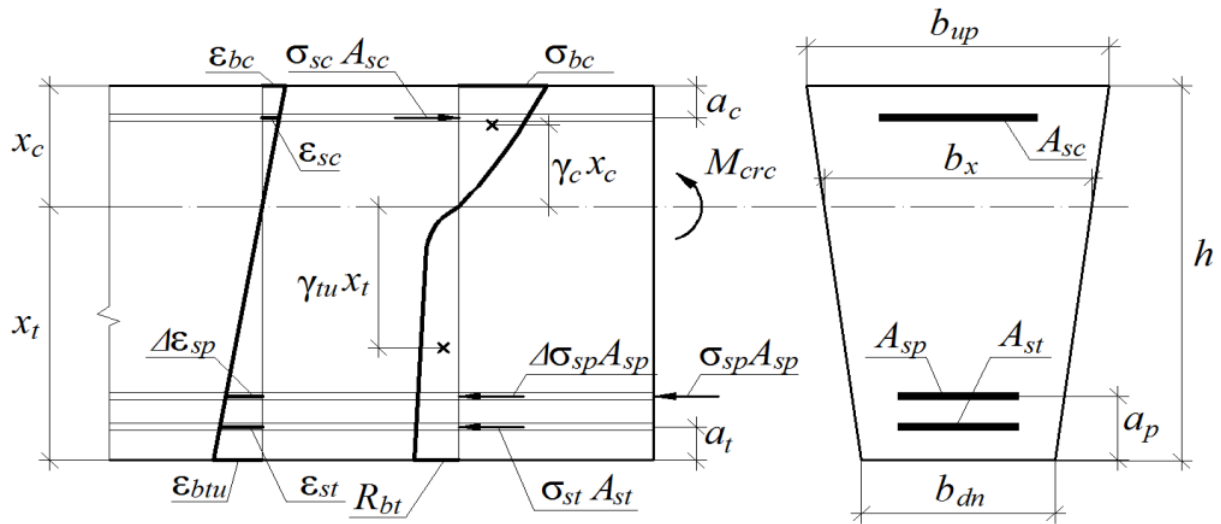


Рис. 3. Расчетная схема железобетонной балки трапециевидного сечения с предварительно напряженной арматурой в растянутой зоне для начальной стадии процесса трещинообразования

По следующей зависимости определяем неизвестную величину b_x :

$$b_x = b_{up} - (b_{up} - b_{dn}) \frac{x_c}{h}, \quad (3)$$

Интегральные геометрические характеристики сжатой зоны бетона находим с помощью зависимостей:

$$\omega_c = \frac{E_{b2} \varepsilon_{bc} b_x}{0,5(b_{up} + b_x) \sigma_{bc} x_c^2} \left\{ I_{c1} + \frac{I_{c2}}{x_c} \left(D_{b2} \varepsilon_{bc} + \frac{b_{up}}{b_x} - 1 \right) + I_{c3} \frac{D_{b2} \varepsilon_{bc}}{x_c^2} \times \left(\frac{b_{up}}{b_x} - 1 \right) \right\}, \quad (4)$$

$$\gamma_c = \frac{E_{b2} \varepsilon_{bc} b_x}{0,5(b_{up} + b_x) \sigma_{bc} x_c^3 \omega_c} \left\{ I_{c2} + \frac{I_{c3}}{x_c} \left(D_{b2} \varepsilon_{bc} + \frac{b_{up}}{b_x} - 1 \right) + I_{c4} \frac{D_{b2} \varepsilon_{bc}}{x_c^2} \times \left(\frac{b_{up}}{b_x} - 1 \right) \right\}, \quad (5)$$

где $I_{c1}, I_{c2}, I_{c3}, I_{c4}$ – расчетные параметры, определяемые по следующим формулам:

$$I_{c1} = \frac{x_c^2}{C_{b2} \varepsilon_{bc}} \left[1 - \frac{\ln(1 + C_{b2} \varepsilon_{bc})}{C_{b2} \varepsilon_{bc}} \right], \quad (6)$$

$$I_{c2} = \frac{x_c^3}{C_{b2} \varepsilon_{bc}} \left\{ \frac{1}{2} - \frac{1}{C_{b2} \varepsilon_{bc}} \left[1 - \frac{\ln(1 + C_{b2} \varepsilon_{bc})}{C_{b2} \varepsilon_{bc}} \right] \right\}, \quad (7)$$

$$I_{c3} = \frac{x_c^4}{C_{b2} \varepsilon_{bc}} \left\{ \frac{1}{3} - \frac{1}{2C_{b2} \varepsilon_{bc}} + \frac{1}{(C_{b2} \varepsilon_{bc})^2} \left[1 - \frac{\ln(1 + C_{b2} \varepsilon_{bc})}{C_{b2} \varepsilon_{bc}} \right] \right\}, \quad (8)$$

$$I_{c4} = \frac{x_c^5}{C_{b2} \varepsilon_{bc}} \left\{ \frac{1}{4} - \frac{1}{3C_{b2} \varepsilon_{bc}} + \frac{1}{2(C_{b2} \varepsilon_{bc})^2} - \frac{1}{(C_{b2} \varepsilon_{bc})^3} \left[1 - \frac{\ln(1 + C_{b2} \varepsilon_{bc})}{C_{b2} \varepsilon_{bc}} \right] \right\}. \quad (9)$$

Для расчета подобных характеристик, но применительно к растянутой зоне бетона, используем зависимости:

$$\omega_{tu} = \frac{E_{b2} \varepsilon_{btu} b_x}{0,5(b_{dn} + b_x) R_{bt} x_t^2} \left\{ I_{t1} + \frac{I_{t2}}{x_t} \left(D_{bt2} \varepsilon_{btu} + \frac{b_{dn}}{b_x} - 1 \right) - I_{t3} \frac{D_{bt2} \varepsilon_{btu}}{x_t^2} \left(1 - \frac{b_{dn}}{b_x} \right) \right\}, \quad (10)$$

$$\gamma_{tu} = \frac{E_{b2} \varepsilon_{btu} b_x}{0,5(b_{dn} + b_x) R_{bt} x_t^3 \omega_{tu}} \left\{ I_{t2} + \frac{I_{t3}}{x_t} \left(D_{bt2} \varepsilon_{btu} + \frac{b_{dn}}{b_x} - 1 \right) - I_{t4} \frac{D_{bt2} \varepsilon_{btu}}{x_t^2} \left(1 - \frac{b_{dn}}{b_x} \right) \right\}, \quad (11)$$

где $I_{11}, I_{12}, I_{13}, I_{14}$ – вспомогательные параметры, которые определяем по формулам (6)...(9) с заменой переменных $I_{c1}, I_{c2}, I_{c3}, I_{c4}, x_c, \varepsilon_{bc}, C_{b2}$ на $I_{11}, I_{12}, I_{13}, I_{14}, x_t, \varepsilon_{btu}, C_{bt2}$.

Следующие условия совместности деформаций записываем для рассматриваемого железобетонного элемента с учетом принятой гипотезы плоских сечений [14, 16, 20]:

$$\frac{\varepsilon_{btu}}{x_t} = \frac{\varepsilon_{bc}}{x_c}, \quad (12)$$

$$x_t = h - x_c, \quad (13)$$

$$\frac{\varepsilon_{sc}}{\varepsilon_{bc}} = 1 - \frac{a_c}{x_c}, \quad (14)$$

$$\frac{\varepsilon_{st}}{\varepsilon_{bc}} = \frac{h - a_t}{x_c} - 1, \quad (15)$$

$$\frac{\Delta\varepsilon_{sp}}{\varepsilon_{bc}} = \frac{h - a_p}{x_c} - 1. \quad (16)$$

Напряжения в предварительно напряженной, сжатой и растянутой арматуре $\sigma_{sp}, \Delta\sigma_{sp}, \sigma_{sc}, \sigma_{st}$ находим с использованием универсальной кусочной функции [17, 18], которую для удобства представим в виде четырех функциональных зависимостей:

$$\sigma_{st} = f_1(\varepsilon_{st}), \quad (17)$$

$$\sigma_{sc} = f_2(\varepsilon_{sc}), \quad (18)$$

$$\sigma_{sp} = f_3(\varepsilon_{sp}), \quad (19)$$

$$\Delta\sigma_{sp} = f_3(\varepsilon_{sp} + \Delta\varepsilon_{sp}) - \sigma_{sp}. \quad (20)$$

По следующей формуле определяем величину краевого напряжения бетона σ_{bc} на верхней сжатой грани сечения балки:

$$\sigma_{bc} = \frac{E_{b2} \varepsilon_{bc} (1 + D_{b2} \varepsilon_{bc})}{1 + C_{b2} \varepsilon_{bc}}. \quad (21)$$

Таким образом, методика определения напряженно-деформированного состояния в нормальном сечении рассматриваемой железобетонной балки трапециевидного поперечного сечения 4. Аналогичное сопоставление величин моментов трещинообразования сечений исследуемых балок из высокопрочных бетонов (В70, В100) дает несколько меньшие значения таких превышений (в диапазоне от 2,4 до 4,6 раза).

5. При увеличении содержания предварительно напряженной арматуры в сечении изгибаемых железобетонных элементов от 0,68 до 2,63 % их трещиностойкость значительно возрастает. В частности, при минимальном уровне преднатяжения арматуры ($\sigma_{sp} = 0,1R_{sn}$) величины

M_{crc} увеличиваются в диапазоне от 1,6 до 2,0 раз. Но максимальный рост величин трещиностойкости (в диапазоне от 2,5 до 2,6 раз) наблюдается при наибольшем значении уровня предварительного напряжения ($\sigma_{sp} = 0,7R_{sn}$).

Полученная методика расчета не содержит эмпирических коэффициентов, в связи с этим данную методику, а соответственно, и программу для ЭВМ возможно использовать для любых классов бетона и арматуры, в том числе и для новых, которые появятся в дальнейшем. Параметры новых классов бетона или арматуры возможно добавить в программу с предварительно напряженной арматурой в растянутой зоне получена для момента перед образованием первой трещины.

Для того чтобы узнать и оценить результаты расчета трещиностойкости образцов по полученной методике, были разработаны общий алгоритм и программа расчета для ЭВМ «TR_PRC_1». На данную программу для ЭВМ было получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021611303 от 21.12.2020 [21].

По полученной программе для ЭВМ «TR_PRC_1» анализировались результаты численного эксперимента. Размеры сечения условного образца, принятого для расчета – высота 45 см, ширина верхней грани 30 см и нижней грани 15 см. В качестве предварительно напряженной арматуры принята арматура класса А600, обычная арматура в растянутой зоне – класса А400 (6,28 см²) и обычная арматура в сжатой зоне – класса А240 (1,57 см²). Изучался момент появления первой трещины M_{crc} в зависимости от площади преднатяженной арматуры (6,28 см², 12,32 см², 24,13 см²) и величины предварительного напряжения. Варьировался также класс бетона – В20, В35, В50, В70, В100. Результаты расчетов представлены в табл. 1.

Выводы. Выполненные численные исследования позволили установить следующие закономерности:

1. Наличие предварительного напряжения в арматуре, расположенной в растянутой зоне сечения железобетонной балки, всегда приводит к существенному повышению величины момента её трещинообразования (M_{crc}).

2. Для любого из рассматриваемых классов бетона при одном и том же армировании поперечного сечения исследуемых балок наблюдается одинаковая тенденция, предусматривающая рост моментов трещинообразования при повышении уровня предварительного напряжения арматуры (σ_{sp}).

3. Для балок из бетонов меньшей прочности (В20, В35) расчетные величины трещиностойкости при наибольшем уровне предварительного

напряжения арматуры ($0,7R_{sn}$) оказались существенно выше (в диапазоне от 2,9 до 5,9 раза) по отношению к образцам без преднапряжения.

Таблица 1

Результаты численных исследований по определению величин моментов трещинообразования ($M_{cr,c}$, кН·м) в предварительно напряженных железобетонных балках трапециевидного поперечного сечения

Класс бетона	Процент армирования A_{sp}	Величина предварительного напряжения арматуры σ_{sp}							
		0	$0,1R_{sn}$	$0,2R_{sn}$	$0,3R_{sn}$	$0,4R_{sn}$	$0,5R_{sn}$	$0,6R_{sn}$	$0,7R_{sn}$
В20	0,68	29,48	40,56	51,32	61,81	71,91	81,34	90,60	99,69
	1,34	34,10	55,15	75,14	94,20	112,23	128,82	144,86	160,36
	2,63	42,79	81,69	117,11	149,54	179,08	205,48	230,07	252,98
В35	0,68	38,65	49,91	60,95	71,81	82,33	92,19	101,94	111,59
	1,34	43,77	65,37	86,24	106,48	125,88	143,91	161,59	178,93
	2,63	53,51	94,12	132,38	168,63	202,75	234,06	264,29	293,50
В50	0,68	46,21	57,52	68,67	79,67	90,33	100,34	110,26	120,11
	1,34	51,79	73,57	94,80	115,52	135,46	154,05	172,38	190,47
	2,63	62,43	103,70	143,14	181,02	217,04	250,34	282,87	314,68
В70	0,68	54,26	65,59	76,79	87,88	98,62	108,69	118,71	128,67
	1,34	60,29	82,18	103,62	124,67	144,95	163,88	182,61	201,17
	2,63	71,84	113,53	153,76	192,75	230,02	264,61	298,65	332,17
В100	0,68	65,58	76,87	88,07	99,17	109,90	119,93	129,93	139,90
	1,34	72,33	94,20	115,72	136,93	157,34	176,37	195,27	214,06
	2,63	85,28	127,09	167,78	207,50	245,52	280,85	315,81	350,44

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кузнецов В.С. Железобетонные и каменные конструкции: Учеб. издан. 2-е изд. М.: Изд-во АСВ, 2016. 360 с.

2. Albero V., Saura H., Hospitaler A., MontalvÀ J.M., Romero M.L. Optimal design of prestressed concrete hollow core slabs taking into account its fire resistance // Advances in Engineering Software. 2018. Vol. 122. Pp. 81–92.

3. Lee D., Han S.J., Ju H., Kim K.S. Shear strength of prestressed concrete beams considering bond mechanism in reinforcement // ACI structural journal. 2021. Vol. 118. No. 3. Pp. 267–277.

4. Accornero F., Cafarelli R., Carpinteri A. Cracking and crushing in prestressed concrete beams // ACI structural journal. 2021. Vol. 118. No. 2. Pp. 101–109.

5. Sharma A., Vishwakarma A., Kushwah S.S. Study of the flexural strengthening of RC concrete and prestressed concrete beams // AIP conference proceedings, International conference on sustainable materials and structures for civil infrastructures, 14–15 March 2019. e020029.

6. Páez P.M., Sensale-Cozzano B. Time-dependent analysis of simply supported and continuous unbounded prestressed concrete beams // Engineering Structures. 2021. No. 240. e112376.

7. Choi J.-H., Choi S.-J., Jay Kim J.-H., Hong

K.-N. Evaluation of blast resistance and failure behavior of prestressed concrete under blast loading // Construction and Building Materials. 2018. Vol. 173. Pp. 550–572.

8. Jokūbaitis A., Marčiukaitis G., Valivonis J. Analysis of reinforcement anchorage zone behavior of prestressed concrete elements under static and cyclic loads // Procedia Engineering. 2017. No. 172. Pp. 457–464.

9. Obernikhin D.V., Nikulin A.I. Experimental studies of deflections in bending reinforced concrete elements taking into account the influence of the shape of their cross-section // Lecture notes in civil engineering. 2021. Vol. 151. Pp. 56–62.

10. Sada M.J., Resan S.F. Structural behavior of hybrid reinforced concrete beams of trapezoidal section. Materials today: proceeding. 2021. Vol. 42. Part 5. Pp. 2733–2741.

11. Kaur I., Rai H.S., Singh H. Flexural Modeling of Trapezoidal Hybrid Beam: Design Charts and Procedure. Materials today: proceeding. 2018 Vol. 5. Iss. 14. Part 2. Pp. 27767–27776.

12. Залесов А.С., Мухамедиев Т.А., Чистяков Е.А. Расчет трещиностойкости железобетонных конструкций по новым нормативным документам // Бетон и железобетон. 2002. № 5. С. 15–19.

13. Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона. М.: Стройиздат, 1996. 416 с.

14. Никулин А.И., Обернихин Д.В., Рубанов В.Г., Свентиков А.А. Трещиностойкость изгибаемых железобетонных элементов трапециевидного сечения на основе применения нелинейной деформационной модели // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2016. № 2. С. 58–63.

15. Никулин А.И., Фролов Н.В., Никулина Ю.А. Трещиностойкость изгибаемых железобетонных элементов с учетом использования в растянутой зоне различных сочетаний стальной и стеклопластиковой арматуры // Бетон и железобетон. 2015. № 3. С. 18–22.

16. Никулина Ю.А. Использование нелинейной деформационной расчетной модели для определения трещиностойкости железобетонных предварительно напряженных балок // Международный студенческий строительный форум – 2018 (к 165-летию со дня рождения В.Г. Шухова): сб. докл.: в 2 т. Белгород: Изд-во БГТУ, 2018. Т.1. С. 133–140.

17. Никулин А.И. К определению предельной относительной деформации бетона в растянутой зоне изгибаемого железобетонного элемента [Электронный ресурс] // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 6. Режим доступа: www.science-education.ru/120-16844 (дата обращения 19.03.2021).

18. Никулин А.И., Обернихин Д.В., Никулина Ю.А. Предельная прочность изгибаемых железобетонных элементов на основе применения энергетического критерия разрушения бетона // Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения: материалы Международных академических чтений. Курск: Курск. гос. ун-т, 2014. С. 98–107.

19. Никулин А.И. Универсальная зависимость для аналитического описания диаграмм растяжения арматурной стали // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2015. № 3. С. 157–162.

20. Кодыш Э.Н., Трекин Н.Н., Федоров В.С., Терехов И.А. Железобетонные конструкции. В 2 ч. Ч. 1. Расчет конструкций: Учеб. для вузов. М.: ООО «Бумажник», 2018. 396 с.

21. Расчет прочности и трещиностойкости предварительно напряженных железобетонных балок трапециевидного поперечного сечения: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021611303 Российская Федерация / Ю.А. Никулина, А.И. Никулин; заявитель и правообладатель Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. № 2020667170 от 21.12.2020; опубл. 25.01.2021. 1 с.

Информация об авторах

Никулина Юлия Александровна, аспирант кафедры строительства и городского хозяйства. E-mail: naiklins@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 21.06.2021

© Никулина Ю.А., 2021

Nikulina Yu.A.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

E-mail: naiklins@yandex.ru

DETERMINATION OF CRACK RESISTANCE OF PRESTRESSED REINFORCED CONCRETE BEAMS OF TRAPEZOIDAL CROSS-SECTION

Abstract. Beams of a trapezoidal cross-section with a wide upper edge with prestressed reinforcement combine positive qualities in terms of strength, crack resistance, deformability and resource saving, which allows them to cover significant spans of multi-storey buildings.

To develop a method for calculating the moment of cracking in these structures, a nonlinear deformation model was adopted, which includes equilibrium equations, conditions for the linear distribution of relative deformations along the height of the element section, and refined deformation diagrams of concrete and reinforcement. Concrete state diagrams are assumed to be nonlinear without a falling branch. To describe the deformation diagrams of high-strength and conventional reinforcement, a universal dependence is adopted, consisting of one linear and two nonlinear equations, in which the calculation of individual parameters is performed using different formulas. For the initial stage of the crack formation process, a design scheme is presented, in accordance with which the necessary equations and ratios are drawn up in relation to the considered prestressed reinforced concrete beam of a trapezoidal cross-section.

The purpose of the study, in addition to developing a calculation methodology, was also the development of an algorithm and a computer calculation program. To obtain and analyze the results, a numerical experiment was carried out, the results of which are presented in tabular form. Due to the fact that the calculation

method was built without involving empirical dependencies, the possibility of its application to determine the crack resistance of prestressed reinforced concrete beams of trapezoidal cross-section for any class of concrete and reinforcement was confirmed.

Keywords: prestressed reinforcement, reinforced concrete beam, trapezoidal cross-section, crack resistance, numerical experiment.

REFERENCES

1. Kuznecov V.S. Reinforced concrete and stone structures [Zhelezobetonnye i kamennye konstrukcii]: Educational edition. 2nd edition. Moscow: Publishing house ASV, 2016. 360 p. (rus)
2. Albero V., Saura H., Hospitaler A., Montalv  J.M., Romero M.L. Optimal design of prestressed concrete hollow core slabs taking into account its fire resistance. *Advances in Engineering Software*. 2018. Vol. 122. Pp. 81–92.
3. Lee D., Han S.J., Ju H., Kim K.S. Shear strength of prestressed concrete beams considering bond mechanism in reinforcement. *ACI structural journal*. 2021. Vol. 118. No. 3. Pp. 267–277.
4. Accornero F., Cafarelli R., Carpinteri A. Cracking and crushing in prestressed concrete beams. *ACI structural journal*. 2021. Vol. 118. No. 2. Pp. 101–109.
5. Sharma A., Vishwakarma A., Kushwah S.S. Study of the flexural strengthening of RC concrete and prestressed concrete beams. AIP conference proceedings, International conference on sustainable materials and structures for civil infrastructures, 14–15 March 2019. e020029.
6. Pablo M. Páez, Beradi Sensale-Cozzano (2021) Time-dependent analysis of simply supported and continuous unbounded prestressed concrete beams. *Engineering Structures*. No. 240. e112376.
7. Choi J.-H., Choi S.-J., Jay Kim J.-H., Hong K.-N. Evaluation of blast resistance and failure behavior of prestressed concrete under blast loading // *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 173. Pp. 550–572.
8. Jok baitis A., Mar iukaitis G., Valivonis J. Analysis of reinforcement anchorage zone behavior of prestressed concrete elements under static and cyclic loads. *Procedia Engineering*. 2017. No. 172. Pp. 457–464.
9. Obernikhin D.V., Nikulin A.I. (2021) Experimental studies of deflections in bending reinforced concrete elements taking into account the influence of the shape of their cross-section. *Lecture notes in civil engineering*. Vol. 151. Pp. 56–62.
10. Sada M.J., Resan S.F. Structural behavior of hybrid reinforced concrete beams of trapezoidal section. *Materials today: proceeding*. 2021. Vol. 42. Part 5. Pp. 2733–2741.
11. Kaur I., Rai H.S., Singh H. Flexural Modeling of Trapezoidal Hybrid Beam: Design Charts and Procedure. *Materials today: proceeding*. 2018 Vol. 5. Iss. 14. Part 2. Pp. 27767–27776.
12. Zalesov A.S., Muhamediev T.A., Chistyakov E.A. Calculation of crack resistance of reinforced concrete structures according to new regulatory documents [Raschet treshchinostojkosti zhelezobetonnyh konstrukcij po novym normativnym dokumentam]. *Concrete and reinforced concrete*. 2002. No. 5. Pp. 15–19. (rus)
13. Karpenko N.I. General models of reinforced concrete mechanics [Obshchie modeli mekhaniki zhelezobetona]. Moscow: Strojizdat, 1996. 416 p. (rus)
14. Nikulin A.I., Obernikhin D.V., Rubanov V.G., Sventikov A.A. Crack resistance of bending reinforced concrete elements of trapezoidal section based on the use of a nonlinear deformation model [Treshchinostojkost izgibaemyh zhelezobetonnyh elementov trapecievidnogo secheniya na osnove primeneniya nelinejnoj deformacionnoj modeli]. *Bulletin of BSTU named after Shukhov*. 2016. No. 2. Pp. 58–63. (rus)
15. Nikulin A.I., Frolov N.V., Nikulina Yu.A. Crack resistance of bent reinforced concrete elements, taking into account the use of various combinations of steel and fiberglass reinforcement in the extended zone [Treshchinostojkost izgibaemyh zhelezobetonnyh elementov s uchetom ispolzovaniya v rastyanutoj zone razlichnyh sochetanij stalnoj i stekloplastikovej armatury]. *Concrete and reinforced concrete*. 2015. No. 3. Pp. 18–22. (rus)
16. Nikulina Yu.A. Use of a nonlinear deformation computational model to determine the crack resistance of reinforced concrete prestressed beams [Ispolzovanie nelinejnoj deformacionnoj raschetnoj modeli dlya opredeleniya treshchinostojkosti zhelezobetonnyh predvaritelno napryazhennyh balok]. *International Student Building Forum – 2018 (to the 165th anniversary of the birth of V.G. Shukhov): collection of reports: in 2 volumes*. Belgorod: Publishing house of BSTU, 2018. Vol.1. Pp. 133–140. (rus)
17. Nikulin A.I. Determination of the ultimate relative deformation of concrete in the tensile zone of a bent reinforced concrete element [K opredeleniyu predelynoj otnositelnoj deformacii betona v rastyanutoj zone izgibaemogo zhelezobetonnoogo elementa]. *Modern problems of science and education*. 2014. No. 6. URL: www.science-education.ru/120-16844 (19.03.2021). (rus)
18. Nikulin A.I., Obernikhin D.V., Nikulina Yu.A. Ultimate strength of bent reinforced concrete elements based on the application of the energy criterion of concrete destruction [Predelynaya

prochnost izgibaemykh zhelezobetonnykh elementov na osnove primeneniya energeticheskogo kriteriya razrusheniya betona]. Security of the construction fund in Russia. Problems and Solutions: Materials of International Academic Readings. Kursk: Kursk State University, 2014. Pp. 98–107. (rus)

19. Nikulin A.I. Universal dependence for analytical description of tensile diagrams of reinforcing steel [Universalnaya zavisimost dlya analiticheskogo opisaniya diagramm rastyazheniya armaturnoj stali]. Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2015. No. 3. Pp. 157–162. (rus)

20. Kodysh E.N., Trekin N.N., Fedorov V.S., Terekhov I.A. Reinforced concrete structures

[Zhelezobetonnye konstrukcii]. In 2 parts. P. 1. Structural analysis: Textbook. for universities. Moscow: LLC "Bumazhnik", 2018. 396 p. (rus)

21. Calculation of strength and crack resistance of prestressed reinforced concrete beams of trapezoidal cross-section [Raschet prochnosti i treshchinos-tojkosti predvaritelno napryazhennykh zhelezobetonnykh balok trapecievidnogo poperechnogo secheniya]: certificate of state registration of a computer program No. 2021611303 the Russian Federation. Yu.A. Nikulina, A.I. Nikulin; applicant and copyright holder Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. No. 2020667170 from 21.12.2020; published 25.01.2021. 1 p. (rus)

Information about the authors

Nikulina, Yulia A. Postgraduate student of construction and municipal facilities department. E-mail: naiklins@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 21.06.2021

Для цитирования:

Никулина Ю.А. Определение трещиностойкости предварительно напряженных железобетонных балок трапециевидного поперечного сечения // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2021. № 11. С. 41–48. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-11-41-48

For citation:

Nikulina Yu.A. Determination of crack resistance of prestressed reinforced concrete beams of trapezoidal cross-section. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2021. No. 11. Pp. 41–48. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-11-41-48