

11. Simbirkin V.N., Panasenکو Yu.V. Simplified nonlinear dynamic calculation of structures under seismic effects. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy*. - 2017. - No. 5 (274). - Pp. 32-36.
12. Simbirkin V.N., Panasenکو Yu.V. Taking into account the instructions of SP 14.13330.2018 when implementing the calculation of structures for seismic effects in the STARK ES software package. *Bulletin of the Research Center "Construction"*. - 2019. - No. 2 (21). - Pp. 103-113.
13. Filimonov A.V. Accounting for Unfound Natural Oscillation Forms in Calculating the Response of Buildings and Structures to Seismic Effects. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy*. 2014. - No. 2. - Pp. 46-53.



УДК 691.328, 692.522

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/ RESEARCH ARTICLE

Выбор поперечных стержней в железобетонных балках при обеспечении минимального расхода арматуры

Ю.А. Шапошникова^{1*}, В.С. Кузнецов²

¹Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Российская Федерация

²Москва, Российская Федерация

*yuliatalyzova@yandex.ru

Ключевые слова: железобетонная балка, поперечная арматура, прочность наклонных сечений, хомут, эффективное армирование.

История статьи

Поступила в редакцию: 10.02.2023

Доработана: 19.02.2023

Принята к публикации: 28.02.2023

Для цитирования

Шапошникова Ю.А., Кузнецов В.С. Выбор поперечных стержней в железобетонных балках при обеспечении минимального расхода арматуры // Железобетонные конструкции. 2023. Т. 2. № 2. С. 65–76.

Аннотация. В работе рассматривается влияние различных факторов на расход поперечной арматуры при конструировании сечений линейных изгибаемых железобетонных элементов. Целью работы является определение степени влияния шага, диаметра и класса поперечных стержней, а также иных факторов, на минимальный расход хомутов при различных уровнях загрузки линейного изгибаемого элемента. Расчетно-аналитический, основанный на результатах применения различных диаметров поперечных стержней, классов арматуры, при изменении шага хомутов от минимального до максимально допустимого нормами, при ступенчато изменяющейся нагрузке в балках прямоугольного сечения. Установлено, что оптимальное продольное одиночное армирование балки достигается при приложении максимальной силы 255 кН из исследуемого диапазона нагрузок. При приложении к балке сосредоточенной силы меньше 125 кН поперечная арматура устанавливается по конструктивным требованиям. Наиболее экономичное решение армирования балки поперечными стержнями достигается при использовании класса А240, при шаге 0,235 м и 0,140 м, с перерасходом 0% и 6,9% соответственно. Использование поперечных стержней из арматуры класса А500С, при принятых параметрах балки 0,3×0,5 м, с одиночным армированием, при приложении силы 255 кН, не является целесообразным, так как сортмент арматурных сталей не предусматривает диаметры меньше 10 мм. Установлены зависимости и уровни влияния применения различного шага, диаметра и классов поперечных стержней, при ступенчато изменяющейся нагрузке, на расход поперечной арматуры в сечении балки. Представленная работа уточняет расход поперечной арматуры для ее наиболее экономичного использования.

Юлия Александровна Шапошникова, к.т.н., доц., доцент кафедры Железобетонных и каменных конструкций, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; eLIBRARY SPIN-код: 2131-2252, Scopus: 57190858958, ResearcherID: P-8986-2018, ORCID: 0000-0001-7740-9400, E-mail: yuliatalyzova@yandex.ru.

Виталий Сергеевич Кузнецов, к.т.н., профессор, независимый исследователь, г. Москва, Российская Федерация; eLIBRARY SPIN-код: 4355-7026, Scopus: 57199931676, ResearcherID: P-8993-2018, ORCID: 0000-0002-5595-9679, E-mail: aspgbk20@yandex.ru

© Шапошникова Ю.А., Кузнецов В.С., 2023



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Selection of Transverse Bars in Reinforced Concrete Beams while Ensuring the Minimum Consumption of Reinforcement

Yu.A. Shaposhnikova^{1*}, V.S. Kuznetsov²

¹Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation

²Moscow, Russian Federation

*yuliatalyzova@yandex.ru

Keywords: collar, effective reinforcement, reinforced concrete beam, strength of inclined sections, transverse reinforcement.

Article history

Received: 10.02.2023

Revised: 19.02.2023

Accepted: 28.02.2023

For citation

Shaposhnikova Y.A., Kuznetsov V.S. Selection of Transverse Bars in Reinforced Concrete Beams while Ensuring the Minimum Consumption of Reinforcement. *Reinforced concrete structures*. 2023; 2(2):65–76.

Abstract. The paper considers the influence of various factors on the consumption of transverse reinforcement in the design of sections of linear bending reinforced concrete elements. The aim of the work is to determine the degree of influence of the pitch, diameter and class of transverse rods, as well as other factors, on the minimum consumption of clamps at various levels of loading of a linear bending element. The calculation and analytical method of research was used, based on the results of applying various diameters of transverse rods, reinforcement classes. The object of the study was a beam of rectangular cross section, in which the step of the clamps varied from the minimum to the maximum allowable standards, with a stepwise changing load. Research results. It has been established that the optimal longitudinal single reinforcement of the beam is achieved by applying a maximum force of 255 kN from the studied load range. When a concentrated force of less than 125 kN is applied to the beam, the transverse reinforcement is installed according to the design requirements. The most economical solution for reinforcing a beam with transverse bars is achieved with class A240 and a step of 0.235 m and 0.140 m, with an overrun of 0% and 6.9%, respectively. The use of transverse bars made of A500C class reinforcement, with the accepted beam parameters of 0.3×0.5 m, with single reinforcement, with the application of a force of 255 kN, is not advisable, since the assortment of reinforcing steels does not provide for diameters less than 10 mm. The dependencies and the levels of influence of the use of different pitches, diameters and classes of transverse rods, with a stepwise changing load, on the minimum consumption of transverse reinforcement in the design section of the beam are established. The presented work specifies the consumption of transverse reinforcement for its most economical use.

ВВЕДЕНИЕ

При проектировании железобетонных элементов, как правило, прежде всего, обращается внимание на его прочность и долговечность и уделяется недостаточно внимания экономической составляющей, направленной на минимизацию финансовых затрат, связанных с расходом применяемых материалов, дополнительными затратами на изготовление элементов и прочее.

Предпосылками для проведения данного исследования является некоторая неопределенность в положениях норм о назначении диаметра и шага хомутов изгибаемых линейных элементов, которые ограничивают только максимальный шаг поперечных стержней и минимальный диаметр прутков.

В то же время использование различных диаметров хомутов в сочетании с переменным шагом открывает возможность получения эффективного решения армирования наклонных сечений при минимальном расходе поперечной арматуры.

Yulia A. Shaposhnikova, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation, eLIBRARY SPIN-код: 2131-2252, Scopus: 57190858958, ResearcherID: P-8986-2018, ORCID: 0000-0001-7740-9400, E-mail: yuliatalyzova@yandex.ru.

Vitaly S. Kuznetsov, Candidate of Technical Sciences, Professor, free researcher, Moscow, Russian Federation, eLIBRARY SPIN-код: 4355-7026, Scopus: 57199931676, ResearcherID: P-8993-2018, ORCID: 0000-0002-5595-9679, E-mail: aspgbk20@yandex.ru

Оптимальным проектированием железобетонных изгибаемых элементов занимались многих российские и зарубежные авторы. В России подобными проблемами оптимального проектирования железобетонных конструкций с учетом надежности и экономичности занимался Складнев Н.Н. В работах Тамразяна А.Г. и Алексеичева А.В. изучена оптимизация конструкций с учетом соотношения производственных затрат и рисков материальных потерь при аварийных ситуациях [1]. Чакрабартти Б.К. изучал модели оптимального проектирования железобетонных балок через взаимосвязь между стоимостью балки и удельной стоимостью материалов, а также размерами балки [2]. В работе Коэльо К.К., Сантоса Ф.Э. и Алонсо Ф.Ф. рассмотрена задача оптимального проектирования балок с помощью генетических алгоритмов [3]. Гарстеки А., Глема А. и Сигалло Дж. в своем исследовании на тему оптимального проектирования железобетонных балок и рам разработали специальный пакет программ [4]. Демби Майкл изучал проблему оптимального и безопасного проектирования арматурных каркасов в железобетонных элементах [5]. Кузнецов В.С. и Шапошникова Ю.А. занимались поиском оптимальных параметров прямоугольных железобетонных балок [6].

Балакай А.А., Филатов В.Б. и другие изучали прочность наклонных сечений железобетонных балок [7-8]. Дженсен С., Минелли Ф. изучали прочность конструкций железобетонных балок с поперечной арматурой на основе теории пластичности [9-10]. В работах Снежкиной О.В., Силантьева А.С., Тихонов И.Н. и других рассмотрены экспериментальные исследования прочности наклонных сечений при действии поперечных сил [11-13].

Кампионе Г. и др. разработали рекомендации по проектированию и моделированию балок, работающих на срез, а также изучили, как коэффициент продольного армирования и рабочая высота сечения влияют на прочность по поперечной силе [14].

Кузнецов В.С., Прокуронова Е.А. и др. рассмотрели влияние нормативных и геометрических допусков на снижение прочности и долговечности железобетонных элементов [15-16].

Мерта И., Кузнецов В.С., Шапошникова Ю.А. и др. изучали оптимизацию изгибаемых железобетонных линейных элементов [17-19].

Практические способы расчёта поперечной арматуры в балках представлены в работах Сутягина А.Е., Корчагина О.П., и других [20-21].

Целью работы является определение степени влияния шага, диаметра и класса поперечных стержней, а также иных факторов, на минимальный расход хомутов при различных уровнях загрузки линейного изгибаемого элемента.

Суть исследования состоит в проведении расчетов прочности наклонных сечений при дискретном увеличении нагрузки от минимальных до максимальных значений, соответствующих обеспечению прочности нормальных сечений в диапазоне $\xi \leq \xi_R$. Алгоритм исследования заключался в расчете площади поперечных стержней при переменном шаге в диапазоне до максимально допустимого нормами.

Основными задачами настоящего исследования являлись:

- определение расчетного диаметра хомутов, рекомендованных нормами, при различных классах поперечной арматуры;
- выбор оптимального шага стержней, различных классов и диаметров арматуры в соответствии с нормативными требованиями;
- сравнение различных вариантов поперечного армирования по расходу арматуры с целью практического применения при проектировании.

МЕТОД

В представленной работе применялся расчетно-аналитический метод исследования, основанный на результатах применения различных диаметров поперечных стержней, классов арматуры, при изменении шага хомутов от минимального до максимально допустимого нормами, при ступенчато изменяющейся нагрузке.

В качестве объекта исследования рассматривался изгибаемый железобетонный элемент (балка), без преднапряжения, прямоугольного сечения с размерами $b \times h$, длиной L и расчётным пролетом l_0 . Элемент, загружался сосредоточенной силой P в середине пролёта. Защитный слой арматуры a_3 и a принят, согласно СП 63.13330.2018 и СП 28.13330.2017. Рабочая высота сечения h_0 . Поперечная арматура принимается в виде хомутов замкнутого профиля из арматуры различных диаметров, класса А240 или А500С. Продольная арматура класса А500С. Расчетная схема и усилия в балке представлены на рисунке 1. Принципиальная схема армирования представлена на рисунке 2.

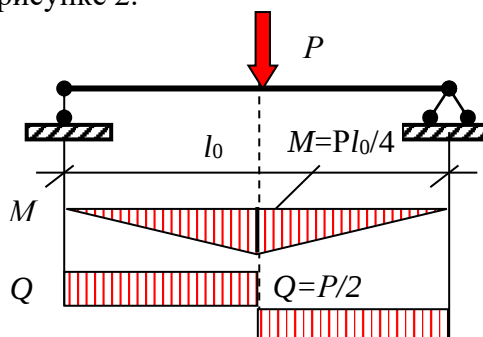


Рис. 1. Расчетная схема и усилия в балке
Figure 1. Design scheme and forces in the beam

Согласно СП 63.13330.2018, в случае установки поперечной арматуры по расчету, шаг стержней S на всей длине элемента должен быть не более $h_0/2$ и не более 300 мм (при высоте элемента до 500 мм).

В балках с высотой сечения $h \geq 150$ мм, в случае установки поперечной арматуры по конструктивным соображениям, то есть на участках, где поперечная сила по расчету воспринимается только бетоном, ее следует устанавливать с шагом не более $0,75h_0$ и не более 500 мм в соответствии с принятыми нормами.

Также, согласно нормам, минимально допустимый диаметр прутков при использовании вязанных каркасов должен быть не менее 6 мм. Тогда как в сварных каркасах, для обеспечения качественного соединения, диаметр поперечных стержней d_w принимают не менее диаметра, устанавливаемого из условия сварки с наибольшим диаметром продольной арматуры по ГОСТ 14098-2014. Согласно нормам отношения диаметров стержней следует принимать для соединений типа К1 - от 0,25 до 1,00, типа К3 - от 0,50 до 1,00.

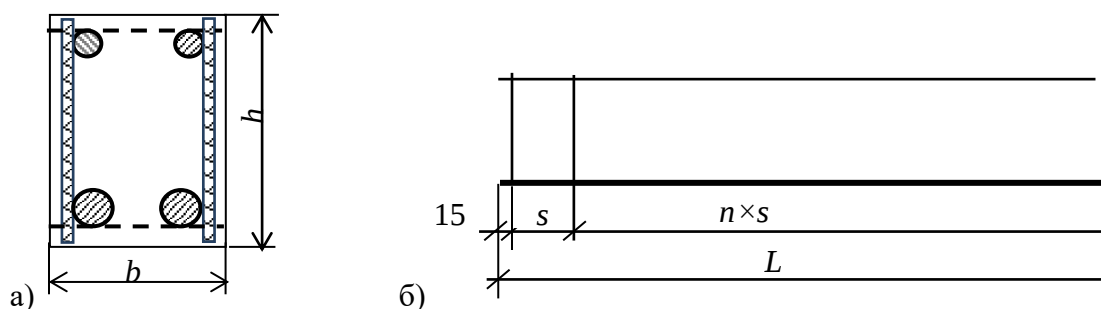


Рис. 2. Схема расстановки: а – арматурного каркаса в сечении; б - поперечных стержней
Figure 2. Arrangement scheme: a - reinforcing cage in section; b - transverse rods

В качестве объекта исследования принята балка прямоугольного сечения, с размерами $b \times h = 0,3 \times 0,5$ м, длиной $L = 6$ м и расчётным пролетом $l_0 = 5,6$ м. Защитный слой арматуры $a_3 = 20$ мм, $a = 30$ мм. Класс бетона В25, $R_b = 14,5$ МПа, $R_{bt} = 1,05$ МПа. Продольная арматура класса А500С, $R_s = 435$ МПа. Поперечная арматура класса А240, $R_{sw} = 170$ МПа или класса А500С,

$R_{sw}=300$ МПа. Шаг стержней S не более $h_0/2=23,75$ см и не более 30 см. Соединения арматурного каркаса сварные.

Расчет прочности нормальных сечений балки (подбор продольной арматуры) производился по известным формулам в соответствии с действующими нормативами, при приложении внешней нагрузки, которое осуществлялось ступенями через 5 кН, при выполнении условия $\xi \leq \xi_R$ ($\alpha_m \leq \alpha_R$).

Для каждого уровня ступенчатой нагрузки $25 \leq P \leq 255$ (кН) вычислялись значения поперечной силы и возможные диаметры поперечных стержней при изменении шага S , от минимального до максимально допустимого нормами.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты вычислений продольной и поперечной рабочей арматуры, полученные из расчетов прочности балки, приведены в таблице 1.

Таблица 1

Основные данные для расчета диаметра и шага хомутов

Сосредоточенная сила P , кН	α_R	Продольная арматура А500С		Поперечная арматура А240		
		Расчетная площадь A_s , см ²	Фактическая арматура, диаметр и площадь, см ²	$d_{w,min}$ при сварке, мм	Расчетная площадь A_{sw} , см ²	Расчетный диаметр, мм
255	0,372	23,18	4d28 с $A_{s,\phi}=24,63$	10	1,57	10
250	0,364	22,51	2d28+2d25 с $A_{s,\phi}=22,14$	10	1,5	10
225	0,328	19,42	4d25 с $A_{s,\phi}=19,63$	8	1,13	10
200	0,291	16,64	2d25+2d22 с $A_{s,\phi}=16,32$	8	0,76	8
175	0,255	14,01	4d22 с $A_{s,\phi}=15,20$	8	0,4	5
150	0,219	11,74	2d20+2d18 с $A_{s,\phi}=11,36$	8	0,03	4
125	0,182	9,52	4d18 с $A_{s,\phi}=10,18$	6	Конструктивно	Конструктивно
100	0,146	7,44	4d16 с $A_{s,\phi}=8,04$	6	Конструктивно	Конструктивно
75	0,109	5,45	4d14 с $A_{s,\phi}=6,16$	5	Конструктивно	Конструктивно
50	0,073	3,56	4d12 с $A_{s,\phi}=4,52$	4	Конструктивно	Конструктивно
25	0,036	1,74	4d12 с $A_{s,\phi}=4,52$	4	Конструктивно	Конструктивно

Table 1

Basic data for calculating the diameter and pitch of clamps

Concentrated power P , kN	α_R	Longitudinal reinforcement А500С		Cross reinforcement А240		
		Estimated area A_s , cm ²	Actual fittings, diameter and area, cm ²	$d_{w,min}$ by welding, mm	Calculation square A_{sw} , cm ²	Estimated diameter, mm
255	0.372	23.18	4d28 с $A_{s,\phi}=24.63$	10	1.57	10
250	0.364	22.51	2d28+2d25 с $A_{s,\phi}=22.14$	10	1.5	10
225	0.328	19.42	4d25 с $A_{s,\phi}=19.63$	8	1.13	10
200	0.291	16.64	2d25+2d22 с $A_{s,\phi}=16.32$	8	0.76	8
175	0.255	14.01	4d22 с $A_{s,\phi}=15.20$	8	0.4	5
150	0.219	11.74	2d20+2d18 с $A_{s,\phi}=11.36$	8	0.03	4
125	0.182	9.52	4d18 с $A_{s,\phi}=10.18$	6	Structurally	Structurally
100	0.146	7.44	4d16 с $A_{s,\phi}=8.04$	6	Structurally	Structurally
75	0.109	5.45	4d14 с $A_{s,\phi}=6.16$	5	Structurally	Structurally
50	0.073	3.56	4d12 с $A_{s,\phi}=4.52$	4	Structurally	Structurally
25	0.036	1.74	4d12 с $A_{s,\phi}=4.52$	4	Structurally	Structurally

Из таблицы 1 видно, что наиболее оптимальное продольное одиночное армирование балки достигается при приложении максимальной силы $P=255$ кН, так как при этом выполняется условие $\alpha_m=\alpha_R$.

Очевидно, что при уменьшении силы P , площадь продольной рабочей арматуры тоже уменьшается, а, следовательно, уменьшается и минимально возможный диаметр поперечных

стержней, который можно применить в балке из условий свариваемости. При приложении силы $P \leq 125$ кН поперечная арматура по расчету не требуется и устанавливается из конструктивных соображений согласно нормам.

Ниже в таблице 2 представлены диаметры поперечных стержней, которые возможно применить при изменении шага хомутов S от минимального до максимально допустимого. При действии силы $P=255$ кН (вычисленная продольная арматура $4d28$ класса А500С с $A_s=24,63$ см²), при которой выполняется условие $\alpha_m \approx \alpha_R$, получены результаты расхода поперечной арматуры класса А240.

Таблица 2

Таблица расхода поперечной арматуры класса А240

Шаг S , м	Требуемая площадь A_{sw} , см ²	Диаметр d_{sw} , мм	Фактическая площадь $A_{sw,ф}$, см ²	Перерасход Δ , см ²	Перерасход Δ , %
0,235	1,57	10	1,57	0	0
0,2	1,34	10	1,57	0,23	14,6
0,17	1,14	10	1,57	0,43	27,4
0,14	0,94	8	1,01	0,07	6,9
0,11	0,74	8	1,01	0,27	26,7
0,08	0,54	8	1,01	0,47	46,5
0,05	0,33	8	1,01	0,68	67,3

Table 2

Table of consumption of transverse reinforcement class А240

Pitch S , m	Required area A_{sw} , cm ²	Diameter d_{sw} , mm	Actual area $A_{sw,ф}$, cm ²	Overspending Δ , cm ²	Overspending Δ , %
0.235	1.57	10	1.57	0	0
0.2	1.34	10	1.57	0.23	14.6
0.17	1.14	10	1.57	0.43	27.4
0.14	0.94	8	1.01	0.07	6.9
0.11	0.74	8	1.01	0.27	26.7
0.08	0.54	8	1.01	0.47	46.5
0.05	0.33	8	1.01	0.68	67.3

Результаты расчётных A_{sw} и фактических $A_{sw,ф}$ площадей поперечных стержней класса А240 при $P=255$ кН, полученные по данным таблицы 2, представлены на рисунке 3.

Из таблицы 2 и графиков (Рис. 3) видно, что наиболее экономичное поперечное армирование балки достигается при шаге 0,235 м, где расчетная A_{sw} и фактическая $A_{sw,ф}$ площади поперечных стержней практически совпадают. Использование поперечных стержней с шагом $S < 0,140$ м не является целесообразным, так как из условий свариваемости невозможно принять диаметр прутков менее 8 мм.

Возможные диаметры поперечных стержней класса А500С, полученные при изменении шага хомутов $0,05 \leq S \leq 0,235$ м, при $P=255$ кН ($\alpha_m \leq \alpha_R$), представлены в таблице 3.

Таблица 3

Таблица расхода поперечной арматуры класса А500С, при $P=255$ кН

Шаг S , м	Требуемая площадь A_{sw} , см ²	Диаметр d_{sw} , мм	Фактическая площадь $A_{sw,ф}$, см ²	Перерасход Δ , см ²	Перерасход Δ , %
0,235	0,89	10	1,57	0,68	43,3
0,2	0,76	10	1,57	0,81	51,6
0,17	0,64	10	1,57	0,93	59,2
0,14	0,53	10	1,57	1,04	66,2
0,11	0,42	10	1,57	1,15	73,2
0,08	0,3	10	1,57	1,27	80,9
0,05	0,19	10	1,57	1,38	87,9

Table 3

Table of consumption of transverse reinforcement class A500C, at $P=255$ kN

Pitch S , m	Required area A_{sw} , cm^2	Diameter d_{sw} , mm	Actual area $A_{sw,f}$, cm^2	Overspending Δ , cm^2	Overspending Δ , %
0.235	0.89	10	1.57	0.68	43.3
0.2	0.76	10	1.57	0.81	51.6
0.17	0.64	10	1.57	0.93	59.2
0.14	0.53	10	1.57	1.04	66.2
0.11	0.42	10	1.57	1.15	73.2
0.08	0.3	10	1.57	1.27	80.9
0.05	0.19	10	1.57	1.38	87.9

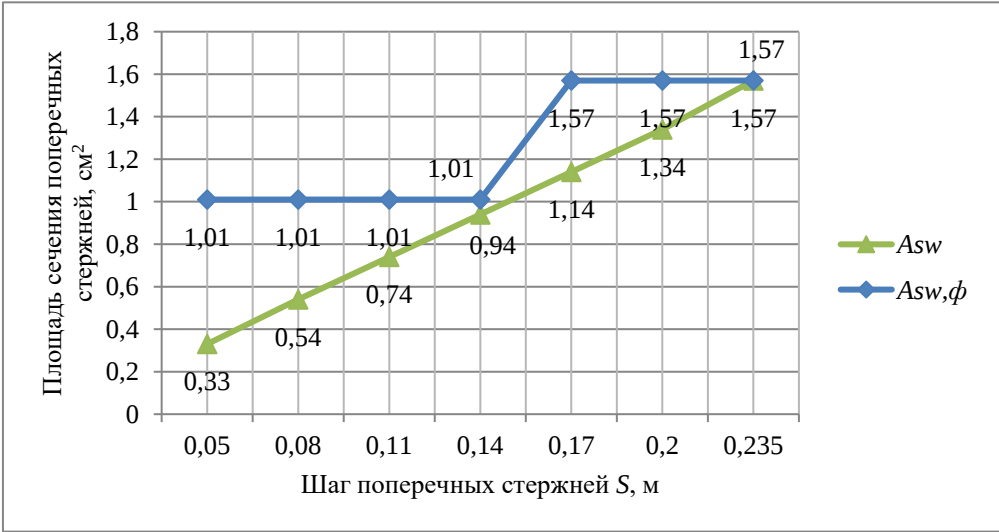


Рис. 3. Расчетные A_{sw} и фактические $A_{sw,\phi}$ площади поперечных стержней класса A240

Figure 3. Calculated A_{sw} and actual $A_{sw,\phi}$, areas of transverse bars of class A240

Графическое представление расчётных A_{sw} и фактических $A_{sw,\phi}$ площадей поперечных стержней класса A500C при $P=255$ кН ($\alpha_m \leq \alpha_R$), полученное по данным таблицы 3, представлено на рисунке 4.

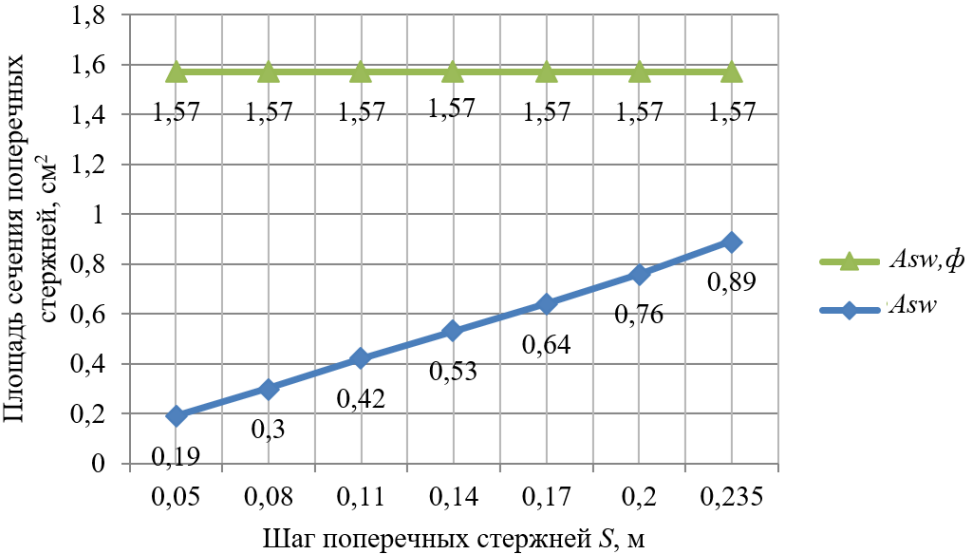


Рис. 4. Расчетные A_{sw} и фактические $A_{sw,\phi}$ площади поперечных стержней класса A500C

Figure 4. Calculated A_{sw} and actual $A_{sw,\phi}$ areas of transverse bars of class A500C

Из таблицы 3 и графиков (Рис. 5) видно, что использование поперечных стержней класса А500С, при принятых параметрах балки и при $P=255$ кН ($\alpha_m \leq \alpha_R$), не целесообразно, так как сортамент арматурных сталей не предусматривает диаметры меньше $d=10$ мм с $A_{sw,\phi}=1,57$ см² для класса А500С, а расчетная площадь поперечных стержней $A_{sw} \leq 0,89$ см² на всем исследуемом диапазоне шага S .

На рисунке 5 представлены графики перерасхода арматуры при различном шаге поперечных стержней из прутков классов А240 и А500С.

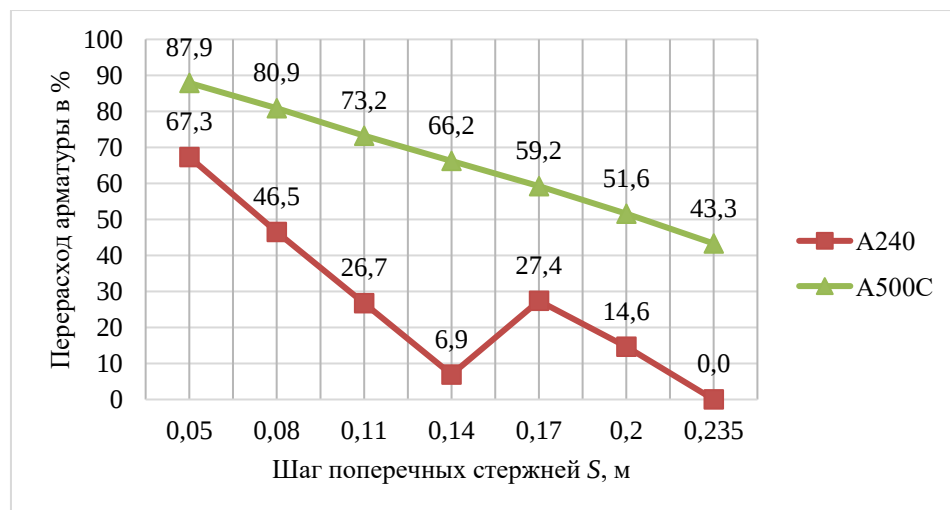


Рис. 5. Перерасход арматуры при различном шаге поперечных стержней из арматуры классов А240 и А500С

Figure 5. Reinforcement overexpenditure with different spacing of transverse bars made of А240 and А500С rebar

Из графиков на рисунке 5 следует, что поперечное армирование из прутков класса А240 представляется более экономичным, чем при использовании класса А500С.

Вариант с хомутами из арматуры класса А240 при шаге стержней $S=0,140$ м достаточно выгодный, так как перерасход составляет всего 6,9%. При ином шаге поперечных стержней при использовании класса А240 перерасход составляет от 14,6 до 67,3%.

Из графиков на рисунке 5 видно, что перерасход для хомутов из арматуры класса А500С составляет от 43,3% при шаге поперечных стержней $S=0,235$ м до 87,9% – при $S=0,05$ м.

Стоит отметить, что наиболее экономичное решение поперечного армирования балки из прутков класса А500С достигается при шаге 0,235 м (максимально допустимом нормами для исследуемого элемента), где разница в расчетной A_{sw} и фактической $A_{sw,\phi}$ площадях поперечных стержней минимальна и перерасход составляет 43,3% (Рис. 5).

Представленные в таблице 3 и на графиках (Рис. 5) результаты говорят о необходимости дополнительного изучения аналогичных балок с поперечной арматурой различных классов, при других вариантах нагружений и при иных размерах сечения.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о недостаточной изученности проблемы и представляют научный интерес для дальнейшего развития представленной темы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Установлены зависимости и уровни влияния применения различного шага, диаметров и классов поперечных стержней, при ступенчато изменяющейся нагрузке, на расход поперечной арматуры в линейных изгибаемых железобетонных элементах.

2. Выявлено, что оптимальное продольное одиночное армирование балки достигается при приложении сосредоточенной силы $P=255$ кН из исследуемого диапазона нагрузок, так

как при этом выполняется условие $\alpha_m = \alpha_R$, а при приложении сосредоточенной силы $P \leq 125$ кН поперечная арматура устанавливается по конструктивным требованиям.

3. Полученные данные говорят о том, что наиболее экономичное решение армирования балки поперечными стержнями достигается при классе A240 и шаге $S=0,235$ м и $S=0,140$ м, с перерасходом 0% и 6,9% соответственно.

4. Использование поперечных стержней класса A500С при изменении шага от 0,05 до 0,235 м, при принятых параметрах балки $0,3 \times 0,5$ м, длиной 6 м, с одиночным армированием, при приложении сосредоточенной силы в середине пролета 255 кН, не является целесообразным, так как сортамент арматурных сталей не предусматривает диаметры меньше $d=10$ мм.

5. Представленное исследование требует дальнейшего развития для других уровней и вариантов нагружений. Полученные данные помогут получить эффективное решение армирования наклонных сечений минимальной стоимости при использовании различных диаметров поперечной арматуры в сочетании с переменным шагом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tamrazyan A.G., Alekseytsev A.V. Optimization of reinforced concrete beams under local mechanical and corrosive damage // Engineering Optimization. 2022. doi.org/10.1080/0305215X.2022.2134356
2. Chakrabarty B.K. Models for optimal design of reinforced concrete beams // Journal of Structural Engineering. 1992. Vol. 118. No. 11. doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1992)118:11(3238)
3. Coello C.C., Hernandez F.S. and Farrera F.A. Optimal design of reinforced concrete beams using genetic algorithms // Journal of Intelligent Learning Systems and Applications. 2014. Vol. 6. No. 4. doi.org/10.1016/S0957-4174(96)00084-X
4. Garstecki A., Glema A., Ścigallo J. Optimal design of reinforced concrete beams and frames // Computer Assisted Mechanics and Eng. Sciences. 1996. No. 3 (3). Pp. 223-231.
5. Demby M., Ścigallo J. Design aspects of the safe structuring of reinforcement in reinforced concrete bending beams // Modern building materials, structures and techniques, MBMST 2016. Procedia Engineering 172. 2017. Pp. 211-217. doi: 10.1016/j.proeng.2017.02.051
6. Kuznetsov V.S., Shaposhnikova Y.A., Yandiev A.A. Selection of the optimal parameters of a reinforced concrete rectangular beam with single reinforcement // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. No. 962 (2): 022055. doi: 10.1088/1757-899X/962/2/022055
7. Балакай А.А., Цыганов М.В., Алейник Д.В., Дмитренко Е.А. Зависимость несущей способности наклонных сечений на действие поперечной силы от изменения длины проекции наклонного сечения // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2020. № 4 (144). С. 50-55.
8. Филатов В.Б., Арцыбасов А.С., Багаутдинов М.А., Гордеев Д.И., Картунов А.И., Никитин Р.А. Анализ расчетных моделей при расчете прочности наклонных сечений железобетонных балок на действие поперечных сил // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2014. Том 16, № 4-3. С. 642-645.
9. Jensen B.C. and Lapko A. On shear reinforcement design of structural concrete beams on the basis of theory of plasticity // Journal of Civil Engineering and Management. 2009. No. 15 (4). Pp. 395-403. doi.org/10.3846/1392-3730.2009.15.395-403
10. Minelli F. and Plizzari G.A. Shear design of FRC members with little or no conventional shear reinforcement // Ailior Made Concrete Structures – Walraven & Stoelhorst (eds). 2008. doi: 10.1201/9781439828410.ch100
11. Снежкина О.В., Егинов Э.В., Ладин Р.А. Оценка влияния вертикальных хомутов на прочность железобетонных балок при действии поперечных сил // Региональная архитектура и строительство. 2014. №3. С. 57-61. Силантьев А.С., Лучкин Е.А. Работа изгибаемых элементов по наклонным сечениям с экстремально малым пролетом среза // Бетон и железобетон. 2020. № 2 (602). С. 28-33.
12. Тихонов И.Н., Саврасов И.П. Исследование прочности железобетонных балок с арматурой класса A500 при действии поперечных сил // Жилищное строительство. 2010. № 9. С. 32-37.
13. Campione G., Monaco A., Minafò G. Shear strength of high-strength concrete beams: Modeling and design recommendations // Engineering Structures. 2014. No. 69 (9). Pp. 116-122. doi: 10.1016/j.engstruct.2014.02.029
14. Кузнецов В.С., Прокуронова Е.А. Геометрические допуски как факторы риска снижения долговечности железобетонных элементов // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2006. №7 (90). С. 22-23.
15. Кузнецов В.С., Кузнецов А.В., Смирнов М.Н. Нормативные допуски как факторы риска снижения долговечности строительных объектов // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2005. №5 (76). С. 80-81.

17. Merta I., Kolbitsch A., Kravanja S. Cost optimization of reinforced concrete beams // Conference: Sixth International Conference Concrete under Severe Conditions Environment & Loading. At: Mérida. Yucatán. México. 2010. [Online]. URL: researchgate.net/publication/282132306_Cost_Optimization_of_Reinforced_Concrete_Beams (date of application: 05.01.2023).
18. Kuznetsov V., Shaposhnikova Y. The cost of flexible elements of a rectangular profile // XIV International Scientific Conference «INTERAGROMASH 2021». Lecture Notes in Networks and Systems. 2022. Vol. 247. Pp. 33–40. doi: 10.1007/978-3-030-80946-1_4
19. Kuznetsov V.S., Shaposhnikova Y.A. The structure of the content and cost of materials in bending reinforced concrete element with variable section height // Lecture Notes in Civil Engineering. 2021. Vol. 151. Pp. 181–187. doi: 10.1007/978-3-030-72910-3_26
20. Сутягин А.Е. Практический способ расчёта поперечной арматуры в балках // Наука и безопасность. 2012. № 4. С. 65-69.
21. Корчагин О.П., Зонина С.В. О специфике расчётов изгибаемых железобетонных конструкций по наклонным сечениям // Социально-экономические и технические системы: исследование, проектирование, оптимизация. 2018. № 1 (77). С. 12-20.

REFERENCES

1. Tamrazyan A.G., Alekseytsev A.V. Optimization of reinforced concrete beams under local mechanical and corrosive damage. *Engineering Optimization*. 2022. doi.org/10.1080/0305215X.2022.2134356
2. Chakrabarty B.K. Models for optimal design of reinforced concrete beams. *Journal of Structural Engineering*. 1992; 118; 11. doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1992)118:11(3238)
3. Coello C.C., Hernandez F.S. and Farrera F.A. Optimal design of reinforced concrete beams using genetic algorithms. *Journal of Intelligent Learning Systems and Applications*. 2014. Vol. 6. No. 4. doi.org/10.1016/S0957-4174(96)00084-X
4. Garstecki A., Glema A., Ścigałło J. Optimal design of reinforced concrete beams and frames. *Computer Assisted Mechanics and Eng. Sciences*. 1996. 3 (3); 223-231.
5. Demby M., Ścigałło J. Design aspects of the safe structuring of reinforcement in reinforced concrete bending beams. Modern building materials, structures and techniques, MBMST 2016. *Procedia Engineering* 172. 2017; 211-217. doi: 10.1016/j.proeng.2017.02.051
6. Kuznetsov V.S., Shaposhnikova Y.A., Yandiev A.A. Selection of the optimal parameters of a reinforced concrete rectangular beam with single reinforcement. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 962 (2): 022055. doi: 10.1088/1757-899X/962/2/022055
7. Balakaj A.A., Cyganov M.V., Alejnik D.V., Dmitrenko E.A. Zavisimost' nesushhej sposobnosti naklonnyh sechenij na dejstvie poperechnoj sily ot izmenenija dliny proekcii naklonnogo sechenija [The dependence of the bearing capacity of inclined sections on the action of the shear force on the change in the length of the projection of the inclined section] // *Vestnik Donbasskoj nacional'noj akademii stroitel'stva i arhitektury* [Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2020; 4 (144); 50-55 (In Russ.)
8. Filatov V.B., Arcybasov A.S., Bagautdinov M.A., Gordeev D.I., Kortunov A.I., Nikitin R.A. Analiz raschetnyh modelej pri raschete prochnosti naklonnyh sechenij zhelezobetonnyh balok na dejstvie poperechnykh sil [Analysis of the design models for calculating the strength of inclined sections of reinforced concrete beams on the action of shear forces]. *Izvestija Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk* [Samara State University of Architecture and Civil Engineering]. 2014; 16; 4-3; 642-645 (In Russ.)
9. Jensen B.C. and Łapko A. On shear reinforcement design of structural concrete beams on the basis of theory of plasticity. *Journal of Civil Engineering and Management*. 2009; 15 (4); 395-403. doi.org/10.3846/1392-3730.2009.15.395-403
10. Minelli F. and Plizzari G.A. Shear design of FRC members with little or no conventional shear reinforcement. *Ailor Made Concrete Structures – Walraven & Stoeelhorst (eds)*. 2008. doi: 10.1201/9781439828410.ch100
11. Snezhkina O.V., Eginov Je.V., Ladin R.A. Ocenka vlijaniya vertikal'nyh homutov na prochnost' zhelezobetonnyh balok pri dejstvii poperechnykh sil [Evaluation of the effect of vertical clamps on the strength of reinforced concrete beams under the action of transverse forces]. *Regional'naja arhitektura i stroitel'stvo* [Regional architecture and construction]. 2014; 3; 57-61 (In Russ.)
12. Silant'ev A.S., Luchkin E.A. Rabota izgibaemykh jelementov po naklonnym sechenijam s jeks-tremal'no malym proletom sreza [The shear resistance of bending elements with extremal small shear span]. *Beton i zhelezobeton* [Concrete and reinforced concrete]. 2020; 2 (602); 28-33 (In Russ.)
13. Tihonov I.N., Savrasov I.P. Issledovanie prochnosti zhelezobetonnyh balok s armaturoj klassa A500 pri dejstvii poperechnykh sil [Study of the strength of reinforced concrete beams with reinforcement class A500 under the action of transverse forces]. *Zhilishhnoe stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2010; 9; 32-37 (rus)

14. Campione G., Monaco A., Minafò G. Shear strength of high-strength concrete beams: Modeling and design recommendations // *Engineering Structures*. 2014; 69 (9); 116-122. doi: 10.1016/j.engstruct.2014.02.029
15. Kuznetsov B.C., Prokuronova E.A. Geometricheskie dopuski kak faktory riska snizheniya dolgo-vechnosti zhelezobetonnyh jelementov [Geometric tolerances as risk factors for reducing the durability of reinforced concrete elements] . *Stroitel'nye materialy, oborudovanie, tehnologii XXI veka* [Building materials, equipment, technologies XXI]. 2006; 7 (90); 22-23. (In Russ.)
16. Kuznetsov B.C., Kuznetsov A.B., Smirnov M.N. Normativnye dopuski kak faktory riska snizheniya dolgovechnosti stroitel'nyh ob'ektov [Regulatory tolerances as risk factors for reducing the durability of construction objects] // *Stroitel'nye materialy, oborudovanie, tehnologii XXI veka* [Building materials, equipment, technologies XXI]. 2005; 5 (76); 80-81 (In Russ.)
17. Merta I., Kolbitsch A., Kravanja S. Cost optimization of reinforced concrete beams // Sixth International Conference Concrete under Severe Conditions Environment & Loading. At: Mérida. Yucatán. México. 2010. [Online]. URL: researchgate.net/publication/282132306_Cost_Optimization_of_Reinforced_Concrete_Beams (date of application: 05.01.2023).
18. Kuznetsov V., Shaposhnikova Y. The cost of flexible elements of a rectangular profile. XIV International Scientific Conference «Interagromash 2021». *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2022; 247; 33–40. doi: 10.1007/978-3-030-80946-1_4
19. Kuznetsov V.S., Shaposhnikova Y.A. The structure of the content and cost of materials in bending reinforced concrete element with variable section height./ *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2021; 151; 181–187. doi: 10.1007/978-3-030-72910-3_26
20. Sutjagin A.E. Prakticheskij sposob raschjota poperechnoj armatury v balkah [A practical way to calculate transverse reinforcement in beams]. *Nauka i bezopasnost'* [Science and security]. 2012; 4; 65-69 (In Russ.)
21. Korchagin O.P., Zonina S.V. O specifike raschjotov izgibaemyh zhelezobetonnyh konstrukcij po naklonnym sechenijam [On the specifics of calculations of bent reinforced concrete structures along inclined sections]. *Social'no-jekonomicheskie i tehicheskie sistemy: issledovanie, proek-tirovanie, optimizacija* [Socio-economic and technical systems: research, design, optimization]. 2018; 1 (77); 12-20 (In Russ.)