

УДК 666.98

В.В. БЕДАРЕВ, канд. техн. наук (ooo-rigul@mail.ru), Н.В. БЕДАРЕВ, инженер, А.В. БЕДАРЕВ, инженер
ООО «Ригул» (654080, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 99-318)

Разъяснения принципиальных аспектов разрушения бетона в контактном слое на основе базовых положений общей теории сцепления и анкеровки арматуры периодического профиля в бетоне

Представлено теоретическое обоснование изменения характера разрушения бетона контактного слоя в зоне анкеровки в зависимости от геометрических параметров периодического профиля арматуры в соответствии с базовыми положениями общей теории сцепления и анкеровки арматуры периодического профиля в бетоне (ОТС). Приведен анализ результатов экспериментальных исследований, подтверждающих изменение характера и последовательности разрушения бетона в зоне анкеровки при изменении шага поперечных ребер кольцевого периодического профиля формы 1ф по ГОСТ 34028–2016 «Прокат арматурный для железобетонных конструкций. Технические условия». Доказана возможность повышения сейсмостойкости железобетонных конструкций согласно ОТС при изменении геометрических размеров профиля и последовательности разрушения бетона в контактном слое. Приведено сравнение свойств арматуры с периодическими профилями по ГОСТ 34028–2016 и арматуры с профилем, соответствующим базовым положениям ОТС, и возможность снижения металлоемкости железобетона за счет включения в работу на растяжение поперечных ребер профиля.

Ключевые слова: характеристика профиля, прочность бетона, арматура, сейсмические воздействия, шаг поперечных ребер, высота ребра, ширина ребра, деформации втягивания.

Для цитирования: Бедарев В.В., Бедарев Н.В. Бедарев А.В. Разъяснения принципиальных аспектов разрушения бетона в контактном слое на основе базовых положений общей теории сцепления и анкеровки арматуры периодического профиля в бетоне // *Бетон и железобетон*. 2021. № 5–6 (607–608). С. 16–24.

V.V. BEDAREV, Candidate of Sciences (Engineering) (ooo-rigul@mail.ru), N.V. BEDAREV, Engineer, A.V. BEDAREV, Engineer
“Rigul” LLC (99-318, Kirova Street, Novokuznetsk, 654080, Russian Federation)

Explanations of the Principal Aspects of Concrete Destruction in the Contact Layer Based on the Basic Provisions of the General Theory of Adhesion and Anchoring of Periodic Profile Reinforcement in Concrete

The theoretical substantiation of the change in the nature of concrete destruction of the contact layer in the anchoring zone depending on the geometric parameters of the periodic profile of the reinforcement in accordance with the basic provisions of the general theory of adhesion and anchoring of the reinforcement of the periodic profile in concrete (GTA) is presented. The analysis of the results of experimental studies confirming the change in the nature and sequence of concrete destruction in the anchoring zone when changing the pitch of the transverse ribs of the circular periodic profile of the form 1f according to GOST 34028–2016 “Reinforcing bars for reinforced concrete structures. Technical conditions” is made. The possibility of increasing the seismic resistance of reinforced concrete structures according to the GTA is proved when changing the geometric dimensions of the profile and the sequence of concrete destruction in the contact layer. The comparison of the properties of reinforcement with periodic profiles according to GOST 34028–2016 and reinforcement with a profile corresponding to the basic provisions of the GTA and the possibility of reducing the metal consumption of reinforced concrete due to including the transverse ribs of the profile in the stretching work is given.

Keywords: profile characteristics, concrete strength, reinforcement, seismic impacts, transverse rib pitch, rib height, rib width, retraction deformations.

For citation: Bedarev V.V., Bedarev N.V., Bedarev A.V. Explanations of the principal aspects of concrete destruction in the contact layer based on the basic provisions of the general theory of adhesion and anchoring of periodic profile reinforcement in concrete. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2021. No. 5–6 (607–608), pp. 16–24. (In Russian).

Форма и геометрические параметры периодического профиля арматуры влияют на прочность сцепления и прочность анкеровки ее в бетоне железобетонных конструкций, обеспечивая стойкость последних, в том числе и при чрезвычайных ситуациях – сейсмических

воздействиях, техногенных авариях и катастрофах, террористических атаках. Взаимодействие арматуры периодического профиля с бетоном в рамках создания технической теории сцепления (ТТС) теоретически и экспериментально разрабатывалось в середине XX в.

Однако по объективным причинам расчет и оптимальные геометрические параметры периодического профиля арматуры и их влияние на стойкость железобетонных конструкций при чрезвычайных внешних воздействиях теоретически так и не были определены.

В СП 63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. СНиП 52-01–2003 (с Изменением № 1)» используется расчетное сопротивление сцепления арматуры с бетоном R_{bond} , прямо зависящее от расчетного сопротивления бетона растяжению R_{bt} .

В расчете коэффициентом η_1 учитывается влияние вида поверхности, а коэффициентом η_2 влияние диаметра арматуры.

Расчет геометрических размеров периодического профиля арматуры обоснован и выполнен в [1, 2], где установлено, что геометрические размеры профиля влияют на характер разрушения анкеровки и стойкость железобетонных конструкций при чрезвычайных внешних воздействиях.

Общая теория сцепления и анкеровки арматуры периодического профиля в бетоне (ОТС) основывается на двух базовых положениях.

Первое базовое положение – разделение характеров разрушения анкеровки. Экспериментально [3] доказано, что разрушение анкеровки арматуры в бетоне при выдергивании стержней происходит:

- по характеру разрушения «срез» при срезе бетона между поперечными ребрами арматуры;
- по характеру разрушения «раскол» при раскалывании бетонного образца.

В ОТС характер разрушения «срез» рассматривается как два характера разрушения бетона в контактном слое:

- разрушение бетона под рабочими площадками (боковыми поверхностями) поперечных ребер периодического профиля арматуры;
- разрушение бетона при срезе бетона части оснований бетонных опорных цилиндров между поперечными ребрами периодического профиля арматуры.

При разрушении анкеровки по характеру «срез» величина напряжений σ_s в арматуре при выдергивании стержней из бетона находится в зависимости от величины относительной площади смятия поперечных ребер периодического профиля f_R .

При разрушении анкеровки по характеру «раскол» величина напряжений σ_s в арматуре при выдергивании стержней из бетона не зависит от величины относительной площади смятия поперечных ребер f_R периодического профиля, а также от формы периодического профиля арматуры.

Второе базовое положение определяет напряженно-деформированное состояние бетонных опор-

ных цилиндров и характер разрушения бетона между поперечными ребрами арматуры периодического профиля.

В [4] показано, что взаимодействие между арматурой периодического профиля и бетоном происходит по опорным кольцевым площадкам поперечных выступов (ребер) арматуры, где между бетоном и арматурой возникают нормальные напряжения.

При характере разрушения «срез» в предельной стадии сцепление или контакт арматуры с бетоном сохраняются только по рабочим площадкам [4] (боковым поверхностям) поперечных ребер, а прочность анкеровки обеспечивается прочностью бетона под рабочими площадками (боковыми поверхностями) поперечных ребер и/или сопротивлением срезу бетона части оснований бетонных опорных цилиндров.

При достаточном поперечном армировании зоны анкеровки [1, 2]:

$$A_{sw} = \frac{R_s}{R_{sw}} \left(2 \cdot A_s - \frac{d \cdot \sin \beta \cdot c \cdot R_{bt}}{4,5263 \cdot (1 + 0,4278 \cdot \log f_R) \cdot R_b} \right) \quad (1)$$

в зависимости от размеров шага поперечных ребер периодического профиля возможно разрушение бетона контактного слоя как в результате среза бетона оснований бетонных опорных цилиндров, так и в результате разрушения бетона под рабочими площадками (боковыми поверхностями) поперечных ребер.

Последовательность разрушения контактного слоя бетона определяется размерами шага поперечных ребер периодического профиля арматуры.

Рассмотрим взаимодействие арматуры и контактного слоя бетона в соответствии с базовыми положениями [1, 2] с учетом поперечного деформирования стержня при различных геометрических размерах периодического профиля арматуры, представленных на рис. 1, и влияние размеров профиля на стойкость железобетонных конструкций при сейсмических и других чрезвычайных воздействиях.

Для геометрических параметров периодического профиля арматуры на рис. 1, a – шаг t поперечных ребер, высота h , ширина в верхней b части, призматическая прочность бетона R_b и сопротивление бетона срезу R_{cp} находятся в следующих соотношениях:

$$B_A = \frac{t-b}{h} \leq B_B - 4 = \frac{R_b}{R_{cp}} = \frac{R_b}{0,7 \cdot \sqrt{R_b \cdot R_{bt}}}; \quad t \leq \frac{R_b}{R_{cp}} \cdot h + b. \quad (2)$$

При указанных геометрических параметрах периодического профиля арматуры напряжения в бетоне опорного цилиндра под рабочей площадкой (боковой поверхностью) поперечного ребра (линия $a-\delta$) не до-

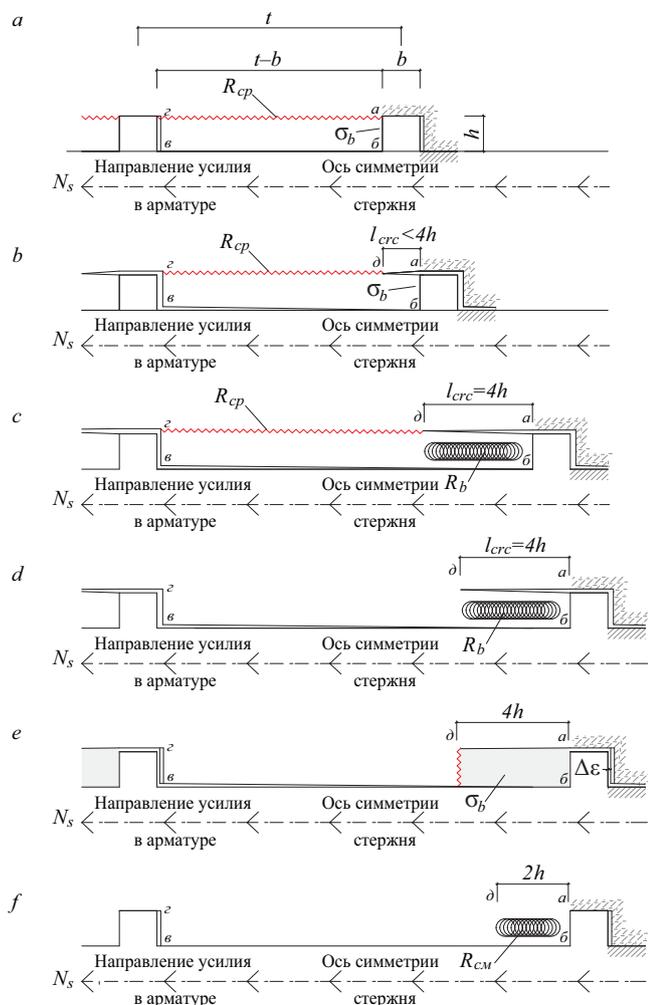


Рис. 1. Изменение характера разрушения бетона контактного слоя при увеличении шага поперечных ребер периодического профиля арматуры

Fig. 1. Changing the nature of the concrete destruction of the contact layer when increasing the pitch of the transverse ribs of the periodic profile of the reinforcement

стигают предельных значений прочности бетона при сжатии $\sigma_b < R_b$.

Трещины от угла рабочей площадки (боковой поверхности) поперечного ребра не образуются. Однако, в результате поперечных деформаций стержня арматуры, деформации растяжения бетона у угла рабочей площадки поперечного ребра (точка a) могут быть близки к предельным $\varepsilon_{br,0} \leq 0,0001$.

Разрушение анкеровки арматуры периодического профиля в бетоне происходит вследствие среза бетона основания бетонного опорного цилиндра по линии $a-\zeta$.

В результате среза бетона основания бетонного опорного цилиндра между поперечными ребрами происходит полное нарушение взаимной связи контактного слоя и бетонной оболочки, а анкеровка арматуры периодического профиля в бетоне разрушается полностью.

Такой характер разрушения анкеровки арматуры периодического профиля в бетоне, например, при сейсмическом воздействии или другой чрезвычайной ситуации, приводит к тому, что после максимального внешнего воздействия происходит обрушение железобетонной конструкции.

Если же после максимального внешнего воздействия, одновременно не произошло разрушения железобетонной конструкции, то разрушение железобетонной конструкции обязательно произойдет в результате последующего воздействия афтершоков, даже и меньшей интенсивности.

Геометрические параметры периодического профиля арматуры, представленные на рис. 1, b – шаг t поперечных ребер, высота h и ширина в верхней b части, призменная прочность бетона R_b и сопротивление бетона срезу R_{cp} находятся в соотношениях:

$$B_B = \frac{R_b}{R_{cp}} + 4 = \frac{R_b}{0,7 \cdot \sqrt{R_b \cdot R_{bt}}} + 4 > B_A =$$

$$= \frac{t-b}{h} > B_B - 4 = \frac{R_b}{R_{cp}} = \frac{R_b}{0,7 \cdot \sqrt{R_b \cdot R_{bt}}};$$

$$\left(\frac{R_b}{R_{cp}} + 4 \right) \cdot h + b > t > \frac{R_b}{R_{cp}} \cdot h + b. \quad (3)$$

При данных геометрических параметрах периодического профиля арматуры напряжения в бетоне опорного цилиндра под рабочей площадкой (боковой поверхностью) поперечного ребра (линия $a-b$) не достигают предельных значений прочности бетона при сжатии $\sigma_b < R_b$.

Однако происходит образование и развитие трещины от угла рабочей площадки (боковой поверхности) поперечного ребра. Длина трещины не превышает $l_{crc} < 4h$.

Разрушение анкеровки арматуры периодического профиля в бетоне происходит вследствие среза бетона части основания бетонного опорного цилиндра по линии $\delta-\zeta$.

В результате среза бетона части основания бетонного опорного цилиндра (линия $\delta-\zeta$) между поперечными ребрами анкеровка арматуры периодического профиля в бетоне разрушается полностью.

Такой характер разрушения анкеровки арматуры периодического профиля в бетоне, например, при сейсмическом воздействии или другой чрезвычайной ситуации, также приводит к тому, что если после максимального внешнего воздействия, не произошло разрушения железобетонной конструкции, то разрушение железобетонной конструкции обязательно произойдет в результате последующего воздействия афтершоков, даже и при меньшей их интенсивности.

По сравнению с предыдущим случаем (рис. 1, a), величина внешнего воздействия для разрушения анкеровки арматуры периодического профиля в бетоне

будет превышать аналогичное значение внешнего воздействия пропорционально значениям характеристики профиля арматуры $B_A = \frac{t-b}{h}$.

Геометрические параметры периодического профиля арматуры на рис. 1, c – шаг t поперечных ребер, высота h и ширина в верхней b части, призматическая прочность бетона R_b и сопротивление бетона срезу R_{cp} находятся в следующих соотношениях [5]:

$$B_A = \frac{t-b}{h} = B_B = \frac{R_b}{R_{cp}} + 4 = \frac{R_b}{0,7 \cdot \sqrt{R_b \cdot R_{bt}}} + 4;$$

$$t = \left(\frac{R_b}{R_{cp}} + 4 \right) \cdot h + b. \quad (4)$$

При данных геометрических параметрах периодического профиля арматуры напряжения в бетоне опорного цилиндра под рабочей площадкой (боковой поверхностью) поперечного ребра (линия $a-\delta$) достигают предельных значений прочности бетона при сжатии $\sigma_b = R_b$.

В результате поперечных деформаций арматуры происходит образование и развитие трещины от угла рабочей площадки (боковой поверхности) поперечного ребра. Длина трещины составляет $l_{crc} = 4h$.

Одновременно напряжения в бетоне части основания (линия $\delta-\varepsilon$) бетонного опорного цилиндра достигают предела прочности при срезе R_{cp} .

Представленный на рис. 1, c характер разрушения анкеровки арматуры периодического профиля в бетоне при равенстве характеристики профиля B_A и характеристики прочности бетона B_B между поперечными ребрами $B_A = B_B$ соответствует прочности анкеровки при максимальном внешнем воздействии.

Однако срез бетона части основания бетонного опорного цилиндра приводит к тем же последствиям, что и в предыдущих двух случаях.

На основании равенства характеристики профиля B_A и характеристики прочности бетона B_B производится расчет геометрических параметров периодического профиля арматуры для железобетонных конструкций, исходя из предельных значений прочности бетона контактного слоя между поперечными ребрами.

Геометрические параметры периодического профиля арматуры на рис. 1, d – шаг t поперечных ребер, высота h и ширина в верхней b части, призматическая прочность бетона R_b и сопротивление бетона срезу R_{cp} находятся в следующих соотношениях [6, 7]:

$$B_A = \frac{t-b}{h} > B_B = \frac{R_b}{R_{cp}} + 4 = \frac{R_b}{0,7 \cdot \sqrt{R_b \cdot R_{bt}}} + 4;$$

$$t > \left(\frac{R_b}{R_{cp}} + 4 \right) \cdot h + b. \quad (5)$$

Геометрические параметры периодического профиля арматуры, представленные на рис. 1, d , таковы, что при разрушении анкеровки напряжения в бетоне опорного цилиндра под рабочей площадкой (боковой поверхностью) поперечного ребра (линия $a-\delta$) достигают предельных значений прочности бетона при сжатии R_b .

Напряжения же в бетоне части основания (линия $\delta-\varepsilon$) бетонного опорного цилиндра не достигают предела прочности при срезе R_{cp} .

В результате происходит частичное разрушение анкеровки арматуры периодического профиля в бетоне – разрушение бетона только под рабочей площадкой (боковой поверхностью) поперечного ребра (линия $a-\delta$).

Частичное разрушение анкеровки следует рассматривать как разрушение анкеровки при проектном землетрясении (ПЗ) согласно СП 14.13330.2018 «Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП II-7-81* (с Изменением № 1)». Напряжения в арматуре соответствуют пределу текучести, а в бетоне под рабочей площадкой поперечного ребра – пределу прочности при сжатии.

При частичном разрушении контактного слоя, т. е. при разрушении бетона под рабочей площадкой (боковой поверхностью) поперечного ребра (линия $a-\delta$) анкеровка арматуры периодического профиля в бетоне сохраняется и обеспечивается сопротивлением срезу бетона части основания бетонного опорного цилиндра (линия $\delta-\varepsilon$).

Разрушение бетона под рабочей площадкой (боковой поверхностью) поперечного ребра (линия $a-\delta$) сопровождается уплотнением разрушенной структуры с одновременным увеличением деформаций $\Delta\varepsilon$ свободного конца стержня арматуры относительно бетона (рис. 1, e).

Принципиально важным является сохранение анкеровки арматуры периодического профиля в бетоне в результате только частичного разрушения контактного слоя бетона и предотвращения прогрессирующего обрушения железобетонной конструкции после внешнего, например сейсмического, воздействия максимальной интенсивности, и особенно при последующих афтершоках по сравнению с разрушениями анкеровки, представленными на рис. 1, a, b .

Для полного разрушения анкеровки, т. е. среза бетона части основания бетонного опорного цилиндра (линия $\delta-\varepsilon$), необходимо внешнее воздействие большей интенсивности, чем для разрушения бетона под рабочей площадкой (боковой поверхностью) поперечного ребра (линия $a-\delta$).

Напряжения в уплотненном бетоне разрушенной части основания бетонного опорного цилиндра при

полном разрушении анкеровки могут превышать предельные значения прочности бетона при сжатии $\sigma_b > R_b$.

Изменением размера периодического профиля между точками d и z или изменением шага t или характеристики профиля B_A можно регулировать величину внешнего разрушающего воздействия при расчете железобетонных конструкций для районов с различной сейсмической активностью и в зависимости от важности объектов в инфраструктуре региона.

Полное разрушение анкеровки арматуры периодического профиля в бетоне следует рассматривать как разрушение анкеровки при максимальном расчетном землетрясении (МРЗ) согласно СП 14.13330.2018.

Геометрические параметры периодического профиля арматуры на рис. 1, f – шаг t поперечных ребер, высота h и ширина в верхней b части, призматическая прочность бетона R_b и сопротивление бетона срезу R_{cp} находятся в следующих соотношениях [6, 7]:

$$B_A = \frac{t-b}{h} > B_B = \frac{R_{cm}}{R_{cp}} + 2 = \frac{R_{cm}}{0,7 \cdot \sqrt{R_{bp} \cdot R_{bt}}} + 2;$$

$$t > \left(\frac{R_{cm}}{R_{cp}} + 2 \right) \cdot h + b. \quad (6)$$

Смятие бетона опорного цилиндра под рабочей площадкой (боковой поверхностью) поперечного ребра (линия $a-b$) характерно для стадии предварительного обжатия при изготовлении предварительно напряженных железобетонных конструкций.

В модели «арматура – контактный слой – бетонная оболочка» [8] «стесненность» в контактном слое создается поперечными деформациями стержня арматуры при передаче предварительного напряжения и сдерживающим влиянием бетонной оболочки за пределами контактного слоя.

Геометрические параметры периодического профиля арматуры, представленного на рис. 1, f , показывают, что при разрушении анкеровки напряжения в бетоне опорного цилиндра под рабочей площадкой (боковой поверхностью) поперечного ребра (линия $a-b$) достигают предельных значений прочности бетона R_{cm} .

Теоретически глубина разрушения бетона при смятии определена в [2] и составляет около двух высот поперечного ребра периодического профиля арматуры, или $2h$.

Среза бетона части основания бетонного опорного цилиндра (линия $d-z$) после разрушения бетона под рабочей площадкой (боковой поверхностью) поперечного ребра (линия $a-b$) не происходит.

Из представленных на рис. 1 вариантов разрушения анкеровки арматуры периодического про-

филя в бетоне при внешних воздействиях, возникающих в результате чрезвычайных ситуаций, предпочтительным является вариант на рис. 1, d , когда геометрические параметры периодического профиля арматуры в виде характеристики $B_A = \frac{t-b}{h}$ превышают значение характеристики прочности бетона $B_B = \frac{R_b}{R_{cp}} + 4 = \frac{R_b}{0,7 \cdot \sqrt{R_{bp} \cdot R_{bt}}} + 4$ между поперечными ребрами профиля.

Шаг t поперечных ребер периодического профиля арматуры обеспечивает разрушение бетонного слоя под рабочей площадкой (боковой поверхностью) поперечного ребра (линия $a-b$) без разрушения бетона части основания бетонного опорного цилиндра в результате среза.

Характеристика профиля B_A показывает, что в сейсмически опасных районах арматура периодического профиля эффективна при применении в тех классах бетона, для которых выполняется условие $B_A > B_B$, т. е. характеристика профиля арматуры B_A должна быть, безусловно, больше характеристики прочности бетона B_B между поперечными ребрами профиля арматуры.

В [9] представлены результаты экспериментальных исследований прочности и деформативности сцепления арматуры различного периодического профиля с бетоном по ГОСТ 34028–2016.

Наибольший интерес представляют результаты измерений деформаций вытягивания стержней, полученные при испытаниях железобетонных балок, армированных арматурой диаметром 20 мм кольцевого периодического профиля формы 1ф с различным шагом поперечных ребер – «частым» при $t=8,1$ мм и «редким» при $t=14,8$ мм.

Графически деформации вытягивания арматуры железобетонных балок Б1-5; Б1-6 и Б2-13; Б2-14 представлены на рис. 2.

Графики деформаций вытягивания арматуры железобетонных балок Б1-5 и Б1-6 показывают, что деформации развивались пропорционально приложенной внешней нагрузке вплоть до разрушения анкеровки арматуры в бетоне.

Разрушение анкеровки и вытягивание арматуры с шагом поперечных ребер $t=8,1$ мм из бетона произошли после приложения максимальной нагрузки в результате интенсивного развития деформаций вытягивания до 2–3,5 мм.

Такое развитие деформаций вытягивания арматуры из бетона указывает на полное разрушение анкеровки арматуры и совпадает с характером разрушения анкеровки в результате среза бетона оснований бетонных опорных цилиндров рассмотренным на рис. 1, a при значениях:

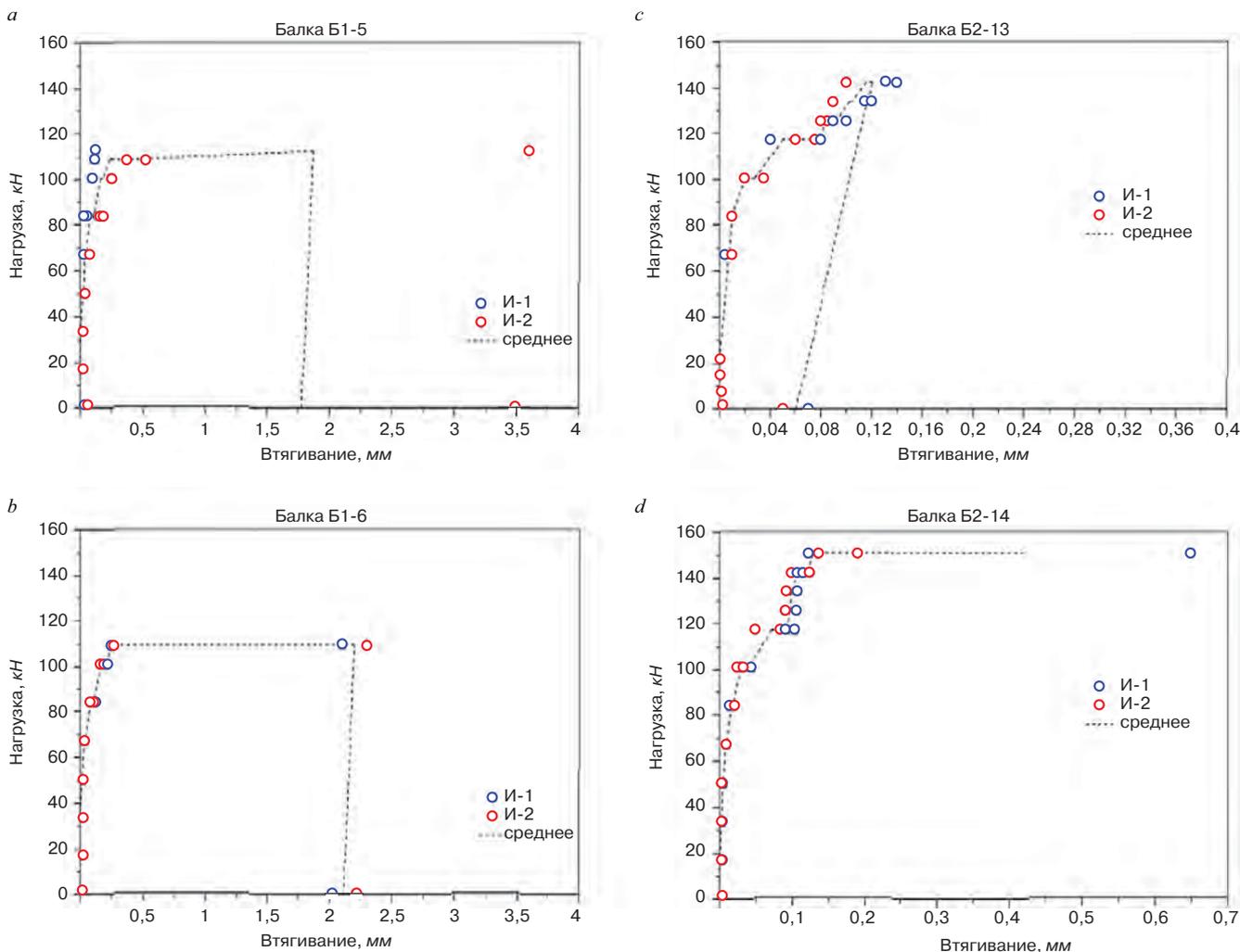


Рис. 2. Графики деформаций втягивания арматуры периодического профиля диаметром 20 мм кольцевого периодического профиля формы 1f при $t=8,1$ мм (рис. а, б, соответствуют рис. 4.41 и 4.42 – нумерация согласно [9]) и $t=14,8$ мм (рис. с, д, соответствуют рис. 4.49 и 4.50 – нумерация согласно [9])

Fig. 2. Graphs of the deformations of the retraction of the reinforcement of the periodic profile with a diameter of 20 mm of the annular periodic profile of the form 1f at $t=8,1$ mm (Fig. a, b) and $t=14,8$ mm (Fig. c, d)

$$B_A = \frac{t-b}{h} \leq B_B - 4 = \frac{R_b}{R_{cp}} = \frac{R_b}{0,7 \cdot \sqrt{R_b \cdot R_{bt}}};$$

$$t \leq \frac{R_b}{R_{cp}} \cdot h + b. \quad (7)$$

Графики деформаций втягивания арматуры с шагом поперечных ребер $t=14,8$ мм железобетонных балок Б2-13 и Б2-14 принципиально отличаются от аналогичных графиков деформаций втягивания арматуры железобетонных балок Б1-5 и Б1-6.

Первое отличие заключается в том, что на графиках деформаций втягивания арматуры с шагом поперечных ребер $t=14,8$ мм железобетонных балок Б2-13 и Б2-14 при внешней нагрузке около 120 кН имеется участок приращения деформаций втягивания величиной, равной или превышающей величину суммарных деформаций втягивания арматуры, достигнутых при предыдущих этапах нагружения.

Величина приращения деформаций втягивания и их последующая стабилизация позволяют утверждать о частичном разрушении бетона контактного слоя в зоне анкеровки арматуры периодического профиля.

Ввиду того, что полное разрушение анкеровки произошло после приложения нагрузки, значительно превышающей нагрузку, при которой отмечено приращение деформаций, можно также утверждать, что приращение деформаций свидетельствует о разрушении бетона контактного слоя под рабочей площадкой (боковой поверхностью) поперечного ребра арматуры, без среза бетона части основания бетонного опорного цилиндра.

Второе отличие состоит в том, что после стабилизации деформаций втягивания на указанном участке увеличение деформаций втягивания арматуры происходит пропорционально последующему увеличе-

нии внешней нагрузки, аналогично увеличению деформаций на ранних этапах нагружения.

Т. е. на графиках имеется две выраженные зоны, в которых деформации втягивания арматуры развиваются пропорционально приложенной внешней нагрузке, и зона интенсивного приращения деформаций втягивания $\Delta\varepsilon$ арматуры при нагружении или во время выдержки под нагрузкой.

Развитие деформаций втягивания арматуры с шагом поперечных ребер $t=14,8$ мм совпадает с рассмотренным на рис. 1, *d*, *e* характером разрушения анкеровки при значениях [6, 7]:

$$B_A = \frac{t-b}{h} > B_B = \frac{R_b}{R_{cp}} + 4 = \frac{R_b}{0,7 \cdot \sqrt{R_b \cdot R_{bt}}} + 4; \quad (8)$$

$$t > \left(\frac{R_b}{R_{cp}} + 4 \right) \cdot h + b.$$

Сравнение графиков деформаций втягивания арматуры с шагом поперечных ребер $t=14,8$ мм железобетонных балок Б2-13 и Б2-14 и графиков деформаций втягивания арматуры железобетонных балок Б1-5 и Б1-6 подтверждает изменение последовательности разрушения бетона контактного слоя в зоне анкеровки при увеличении шага поперечных ребер профиля и необходимость отдельного рассмотрения характеров разрушения в расчетах анкеровки в соответствии с базовыми положениями [1, 2].

Из графика деформаций втягивания арматуры с шагом поперечных ребер $t=14,8$ мм железобетонных балок Б2-13 и Б2-14 также следует, что в процессе рассматриваемого нагружения разрушение бетона опорного цилиндра под рабочей площадкой (боковой поверхностью) поперечного ребра, сопровождаемое значительным приращением деформаций втягивания $\Delta\varepsilon$ арматуры, можно рассматривать как разрушение анкеровки при проектном землетрясении (ПЗ) согласно СП 14.13330.2018.

Частичное разрушение анкеровки при проектном землетрясении (ПЗ) предотвращает процесс прогрессирующего обрушения конструкций в результате воздействия афтершоков.

Для полного же разрушения анкеровки вследствие среза бетона части основания бетонного опорного цилиндра необходимо приложение существенно большей по величине внешней нагрузки, как изложено в [1, 2], что следует рассматривать как разрушение анкеровки при максимальном расчетном землетрясении (МРЗ) согласно СП 14.13330.2018.

Необходимо также отметить, что при испытании железобетонных балок Б2-13 и Б2-14 разрушающая нагрузка превышала разрушающую нагрузку, достигнутую при испытании железобетонных балок Б2-15 и Б2-16, армированных арматурой серповид-

ного периодического профиля формы 2ф диаметром 20 мм на 9,85%.

При этом предел текучести σ_T арматуры серповидного периодического профиля формы 2ф по результатам испытания стержней был на 8,1% выше предела текучести σ_T арматуры кольцевого периодического профиля формы 1ф с шагом поперечных ребер $t=14,8$ мм (с «редким» расположением поперечных ребер).

Согласно данным [9] временное сопротивление σ_g арматуры кольцевого периодического профиля формы 1ф с шагом поперечных ребер $t=14,8$ мм (с «редким» расположением поперечных ребер) превышает предел текучести σ_T на 30,4%, а арматуры с шагом поперечных ребер $t=8,1$ мм (с «частым» расположением поперечных ребер) в среднем на 29,03%.

Разрушающая нагрузка, достигнутая при испытании железобетонных балок Б2-13 и Б2-14, превышает нагрузку разрушения бетона контактного слоя под рабочей площадкой поперечного ребра на 21,4% и 28,5% соответственно.

Поэтому можно утверждать, что разрушение анкеровки при срезе бетона в контактном слое арматуры кольцевого периодического профиля формы 1ф с шагом поперечных ребер $t=14,8$ мм (с «редким» расположением поперечных ребер) происходит при напряжениях выше предела текучести σ_T арматуры, вплоть до временного сопротивления σ_g .

При значениях шага поперечных ребер $t > \left(\frac{R_b}{R_{cp}} + 4 \right) \cdot h + b$ [6, 7] и заданной длине анкеровки l_{an} напряжения в арматуре теоретически могут определяться в зависимости от площади поверхности среза:

$$\sigma_s = R_{cp} \cdot \pi \cdot d_1 \cdot \left[l_{an} - \frac{l_{an}}{t} \cdot (b + 4 \cdot h) \right] = R_{cp} \cdot \pi \cdot d_1 \cdot l_{an} \cdot \left(1 - \frac{b + 4 \cdot h}{t} \right) =$$

$$= R_{cp} \cdot \pi \cdot (d + 2 \cdot h) \cdot l_{an} \cdot \left(1 - \frac{b + 4 \cdot h}{t} \right). \quad (9)$$

Следовательно, увеличение в периодическом профиле арматуры шага поперечных ребер $t > \left(\frac{R_b}{R_{cp}} + 4 \right) \cdot h + b$, т. е. до требований [6, 7], и изменение характера разрушения анкеровки в соответствии с базовыми положениями [1, 2] позволит существенно повысить стойкость железобетонных конструкций при чрезвычайных внешних воздействиях и предотвратить их прогрессирующее разрушение.

Результаты исследований [9] также показывают, что относительная площадь смятия поперечных ребер f_R некорректно отражает анкерующую способность периодического профиля арматуры [1, 2].

Например [9], арматура диаметром 20 мм кольцевого профиля формы 1ф и относительной площадью смятия поперечных ребер $f_R=0,104$ имеет мень-

шую прочность сцепления, чем прочность сцепления арматуры серповидного профиля с относительной площадью смятия $f_R=0,076$ и тем более кольцевого профиля с $f_R=0,057$ (с «редким» расположением поперечных ребер).

Арматура же диаметром 12 мм кольцевого профиля формы 1ф и относительной площадью смятия поперечных ребер $f_R=0,097$ имеет большую прочность сцепления, чем прочность сцепления арматуры серповидного профиля с относительной площадью смятия $f_R=0,071$.

В настоящее время промышленностью выпускается арматура для железобетонных конструкций с тремя основными формами периодического профиля по ГОСТ 34028–2016 «Прокат арматурный для железобетонных конструкций. Технические условия».

Арматура с кольцевым профилем формы 1ф имеет максимальную площадь рабочей площадки (боковой поверхности) поперечного ребра.

Арматура с серповидным профилем формы 2ф имеет максимальный предел выносливости при многократно повторных нагрузках вследствие отсутствия концентраторов напряжений в пересечении продольных и поперечных ребер профиля.

Арматура с винтовым профилем позволяет соединять между собой отдельные стержни без сварки в условиях строительной площадки.

При этом поперечные ребра указанных периодических профилей не включаются в работу арматуры при растяжении и составляют 6–7% от массы арматурного стержня.

Арматура периодического профиля формы по [5–7] имеет максимальную площадь рабочей площадки (боковой поверхности) поперечного ребра, как кольцевой профиль формы 1ф, максимальный предел выносливости при многократно повторных нагрузках, как серповидный формы 2ф и позволяет соединять между собой отдельные стержни без сварки, как винтовой профиль.

Т. е. арматура периодического профиля формы по [5–7] объединяет в себе положительные свойства арматуры всех выпускаемых профилей.

Кроме того, поперечные ребра периодического профиля формы по [5–7] полностью включаются в работу арматуры при растяжении, что позволяет снизить массу погонного метра арматурного проката на 6–7%, соответственно снизить металлоемкость железобетонных конструкций и увеличить выпуск арматурного проката в погонных метрах без увеличения производства стали.

Выводы

1. Арматура для железобетонных конструкций, применяемых в сейсмических опасных районах,

должна иметь периодический профиль с геометрическими размерами, определенными в соответствии с требованиями [1, 2] по формуле [6, 7]:

$$B_A = \frac{t-b}{h} > B_B = \frac{R_b}{R_{cp}} + 4 = \frac{R_b}{0,7 \cdot \sqrt{R_b \cdot R_{bt}}} + 4; \\ t > \left(\frac{R_b}{R_{cp}} + 4 \right) \cdot h + b. \quad (10)$$

2. Теоретически обоснованный в ОТС переход от расчета разрушения анкеровки при срезе оснований бетонных опорных цилиндров к расчету разрушения анкеровки вследствие разрушения бетонных опорных цилиндров под рабочими площадками (боковой поверхностью) поперечных ребер профиля при увеличении шага [1, 2] подтвержден экспериментальными исследованиями [9].

3. Экспериментально доказана [9] теоретически обоснованная в ОТС последовательность разрушения анкеровки арматуры периодического профиля в бетоне контактного слоя при увеличении шага поперечных ребер [1, 2]:

– разрушение бетона контактного слоя под рабочими площадками (боковыми поверхностями) поперечных ребер;

– разрушение бетона контактного слоя при срезе части оснований бетонных опорных цилиндров повышающая стойкость железобетонных конструкций при чрезвычайных внешних воздействиях – техногенных авариях и катастрофах, террористических атаках и особенно при сейсмических воздействиях и препятствующая прогрессирующему обрушению железобетонных конструкций.

4. Экспериментально подтверждена [9] теоретически обоснованная в ОТС необходимость увеличения шага поперечных ребер периодического профиля арматуры для железобетонных конструкций в соответствии с расчетами [1, 2] и требованиями [5–7].

5. Общая теория сцепления и анкеровки арматуры периодического профиля в бетоне [1, 2] наиболее точно соответствует действительному напряженно деформированному состоянию модели «арматура – контактный слой – бетонная оболочка» [8] при взаимодействиях: «арматура – бетонная оболочка»; «арматура – контактный слой»; «арматура – контактный слой – бетонная оболочка».

6. Относительная площадь смятия поперечных ребер f_R некорректно отражает анкерующую способность периодического профиля арматуры [1, 2].

7. Характеристика профиля B_A [1, 2] в большей степени соответствует показателям анкерующей способности арматуры периодического профиля.

Список литературы

1. Бедарев В.В., Бедарев Н.В., Бедарев А.В. Общая теория сцепления и анкеровки арматуры периодического профиля в бетоне. Новокузнецк: СибГИУ, 2014. 160 с.
2. Бедарев В.В., Бедарев Н.В., Бедарев А.В. Общая теория сцепления и анкеровки арматуры периодического профиля в бетоне. Новокузнецк: СибГИУ, 2020. 267 с.
3. Мадатян С.А. Арматура железобетонных конструкций. М.: Воентехлит, 2000. 256 с.
4. Цейтлин С.Ю. О природе сцепления стержневой арматуры с бетоном. В кн.: Сцепление арматуры с бетоном. М.: НИИЖБ, 1971. С. 47–53.
5. Патент РФ 2545235 С1. Арматурный стержень периодического профиля / Бедарев В.В., Бедарев Н.В., Бедарев А.В., Звездов А.И. Заявл. 11.09.2013. Оpubл. 27.03.2015. Бюл. № 9.
6. Патент РФ 2574087 С2. Универсальный арматурный стержень периодического профиля / Бедарев В.В., Бедарев Н.В., Бедарев А.В., Звездов А.И. Заявл. 15.04.2014. Оpubл. 28.12.2015. Бюл. № 29.
7. Патент РФ 2599647 С1. Арматурный стержень периодического профиля / Бедарев В.В., Бедарев Н.В., Бедарев А.В., Звездов А.И. Заявл. 26.05.2015. Оpubл. 19.09.2016. Бюл. № 28.
8. Холмянский М.М. Контакт арматуры с бетоном. М.: Стройиздат, 1981. 184 с.
9. Исследование прочности и деформативности сцепления арматуры различного периодического профиля по ГОСТ 34028–2016 с бетоном. Отчет НИОКР. М.: АО НИЦ «Строительство». 2020. 156 с.

- and anchoring of reinforcement periodic profile in concrete]. Novokuzneck: SibGIU 2014. 160 p.
2. Bedarev V.V., Bedarev N.V., Bedarev A.V. Obschaya teoriya stsepleniya i ankerovki armatury periodicheskogo profilya v betone. [General theory of adhesion and anchoring of reinforcement periodic profile in concrete] Novokuzneck: SibGIU. 2020. 267 p.
3. Madatyan S.A. Armatura zhelezobetonnykh konstrukcij [Reinforcement of reinforced concrete structures]. Moscow: Voentehlit. 2000. 256 p.
4. Tseitlin S.Y. O prirode stsepleniya stержневой armatury s betonom [On the nature of the adhesion of rebar to concrete.]. V kn.: Stseplenie armatury s betonom. Moscow: NIIZhB, 1971, pp. 47–53.
5. Patent RF 2545235 C1. Armaturnyj sterzhen' periodicheskogo profilya [Periodic profile reinforcement bar]. Bedarev V.V., Bedarev N.V., Bedarev A.V., Zvezdov A.I. Declared 11.09.2013. Published 27.03.2015. Bulletin No. 9. (In Russian).
6. Patent RF 2574087 C2. Universal'nyj armaturnyj sterzhen' periodicheskogo profilya [Periodic profile universal reinforcement bar]. Bedarev V.V., Bedarev N.V., Bedarev A.V., Zvezdov A.I. Declared 15.04.2014. Published 28.12.2015. Bulletin No. 29. (In Russian).
7. Patent RF 2599647 C1. Armaturnyj sterzhen' periodicheskogo profilya [Periodic profile reinforcement bar]. Bedarev V.V., Bedarev N.V., Bedarev A.V., Zvezdov A.I. Declared 26.05.2015. Published 19.09.2016. Bulletin No. 28. (In Russian).
8. Holmyanskij M.M. Kontakt armatury s betonom [Reinforcement bar adhesion to concrete]. Moscow: Stroyizdat. 1981. 184 p.
9. Issledovanie prochnosti i deformativnosti stsepleniya armatury razlichnogo periodicheskogo profilya po GOST 34028–2016 s betonom [Research of the strength and deformability of adhesion of reinforcement of various periodic profiles according to GOST 34028–2016 with concrete]. Otchet NIOKR. Moscow: AO NITS Stroitel'stvo. 2020. 156 p.

References

1. Bedarev V.V., Bedarev N.V., Bedarev A.V. Obschaya teoriya stsepleniya i ankerovki armatury periodicheskogo profilya v betone [General theory of adhesion

СПЕЦИАЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

Учебное пособие «Промышленное и гражданское строительство. Введение в профессию»

Авторы: Грызлов В.С., Ворожбянов В.Н., Гендлина Ю.Б., Залипаева О.А., Каптюшина А.Г., Медведева Н.В., Петровская А.А., Поварова О.А., Чорная Т.Н.

Научный редактор – д-р техн. наук, проф. В.С. Грызлов
Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2021. 276 с.

Дана общая характеристика профессии строитель. Приведены сведения из истории развития строительной отрасли. Предложено краткое описание видов строительной продукции, особенностей проектирования строительных объектов, технологии и порядка организации возведения зданий и сооружений; раскрыты вопросы менеджмента в строительстве. Подчеркнута важность строительной науки и цифровизации строительной деятельности. Отдельная глава посвящена особенностям организации инженерно-строительного обучения. Для студентов бакалавриата, начавших обучение по направлению «Строительство». Может быть использовано для профориентационной работы с выпускниками школ.



По вопросам приобретения обращайтесь в издательство «Инфра-Инженерия»