

Научная статья
УДК 624.072.2
<https://doi.org/10.24866/2227-6858/2024-3/56-66>

Применение гнутых арматурных стержней в железобетонных конструкциях

Данил Сергеевич Винокуров✉

Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина,
Екатеринбург, Российская Федерация
✉ danil.vinokurov.1999@mail.ru

Аннотация. В статье выполнен анализ отечественных источников нормативной и научно-технической литературы по вопросу применения гнутых арматурных стержней в железобетонных конструкциях. Исследованы требования зарубежных норм проектирования, связанные с определением совместной работы гнутых арматурных стержней и бетона конструкции, обеспечением прочности бетона на скалывание и ограничением предельных деформаций арматуры. Составлены рекомендации для проектирования с учетом требований по обеспечению несущей способности конструкций и современных реалий уровня технического потенциала подрядных организаций.

Ключевые слова: гнутые арматурные стержни, скалывание бетона, радиусы загиба стержней, передача усилий, предельная деформация арматуры

Для цитирования: Винокуров Д.С. Применение гнутых арматурных стержней в железобетонных конструкциях // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2024. № 3(60). С. 56–66.

Original article

The use of bent reinforcing bars in reinforced concrete structures

Danil S. Vinokurov✉

Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russian Federation
✉ danil.vinokurov.1999@mail.ru

Abstract. The article analyzes domestic sources of normative and scientific and technical literature on the use of bent reinforcing bars in reinforced concrete structures. The requirements of foreign design standards related to the definition of joint work of bent reinforcing bars and concrete structures, ensuring the strength of concrete for chipping and limiting the ultimate deformations of reinforcement are investigated. Recommendations for design have been compiled taking into account the requirements for ensuring the bearing capacity of structures and modern realities of the level of technical potential of contractors.

Keywords: bent reinforcing bars, concrete chipping, bending radii of the bars, force transfer, ultimate deformation of the reinforcement

For citation: Vinokurov D.S. The use of bent reinforcing bars in reinforced concrete structures. *FEFU: School of Engineering Bulletin*, 2024, no. 3(60), pp. 56–66. (In Russ.).

Введение

При проектировании узлов железобетонных конструкций применяются гнутые арматурные стержни для передачи усилий, анкеровки стержней, поперечного армирования. Нарушение параметров загиба стержней приводит к несоответствию свойств конструкций требованиям нормативных документов. Во избежание появления факторов обрушения либо дорого-

стоящего ремонта конструкции необходимо выполнять данные узлы в соответствии с рекомендациями норм проектирования. Однако в редакциях как отечественных, так и зарубежных норм проектирования имеются противоречия, а требования к гнутым стержням не детализированы в достаточной степени.

Необходимо определить противоречия и пробелы в нормативных документах для обеспечения рационального проектирования и удобства выполнения подрядных работ с учетом обеспечения необходимой несущей способности конструкций и современных реалий уровня технического потенциала подрядных организаций. Для этого следует рассмотреть влияние многочисленных параметров гнутых стержней на прочность конструкции и сопоставить имеющиеся в нормативной документации данные с показателями научных исследований. Научные исследования в области гнутых арматурных стержней активно проводятся учеными всего мира, особенно выделяются публикации европейских авторов Frederic Monney, Miguel Fernandez Ruiz, Aurelio Muttoni и их экспериментальные исследования. В Российской Федерации вопрос прочности конструкций с применением гнутых арматурных стержней рассматривается в меньшей степени.

Требования нормативных документов РФ и зарубежных норм проектирования

В документах, обеспечивающих нормативно-техническое регулирование в сфере строительства на территории Российской Федерации (СП 63.13330.2018, ГОСТ 34028-2016, ГОСТ Р 52544-2006), представлены требования к применению гнутых арматурных стержней и параметров загибов. Однако существуют некоторые расхождения в действующих нормативных актах, в рекомендациях по гибке стержней. Диаметр оправки устанавливается в зависимости от диаметра гнутого стержня. Согласно основным нормативным документам (СП 63.13330.2018) диаметры прутков представлены двумя группами, а строповочные петли – тремя группами (Пособие к СП 63.13330.2018). Также в документах, регламентирующих технические условия (ТУ) для арматурных стержней (ГОСТ 34028-2016, ГОСТ Р 52544-2006), представлены три группы диаметров оправок для испытания проката на изгиб с разгибом (табл. 1).

Таблица / Table 1

Требования нормативных документов РФ к диаметру оправки гнутых стержней
Requirements of regulatory documents of the Russian Federation
for the diameter of the mandrel of bent bars

ГОСТ 34028-2016		СП 63.13330.2018			Пособие к СП 63.13330.2018 (требование к петлям)	
Диаметр стержня, мм	Минимальный диаметр оправки, D	Диаметр стержня, мм	Минимальный диаметр оправки, D		Диаметр стержня, мм	Минимальный диаметр оправки, D, мм
			для гладких стержней	для стержней периодического профиля		
≤ 16	5d	< 20	2,5d	5d	≤ 12	20
> 16 ≤ 25	8d				> 12 ≤ 16	30
> 25 ≤ 50	10d	≥ 20	4d	8d	> 16 ≤ 22	40
					> 25	60

В европейских стандартах BS EN 1992-1-1 минимальный радиус изгиба устанавливается аналогичным образом и зависит от пластических свойств сталей используемых классов стержней. В кодексе США ACI 318-19 радиус изгиба стержней также зависит только от диаметра стержня (табл. 2) [1, 2].

Таблица / Table 2

Требования зарубежных нормативных документов к диаметру оправки гнутых стержней
Requirements of foreign regulatory documents for the diameter of the mandrel of bent bars

BS EN 1992-1-1		ACI 318-19	
Диаметр стержня, мм	Минимальный радиус загиба, R, мм	Диаметр стержня, мм	Минимальный диаметр оправки, D
8	16	10–25	6d
10	20		
12	24		
16	32		
20	70	29, 32, 36	8d
25	87		
32	112	43, 57	10d
40	140		

Факторы, влияющие на параметры загибов стержней

Для конструкций с гнутыми арматурными стержнями возможны следующие варианты разрушения [3-5]:

- разрушение арматурного стержня в процессе гибки арматуры и при действии эксплуатационных нагрузок (рис. 1);
- разрушение бетона из-за отслоения бетонного покрытия перпендикулярно плоскости изгиба (рис. 2а);
- разрушение бетона из-за отслоения бетонного покрытия параллельно плоскости изгиба (рис. 2б);
- выдергивание (проскальзывание) арматурного стержня (рис. 2в).



Рис. 1. Разрушение арматурного стержня в процессе гибки арматуры [4]

Fig. 1. The destruction of the reinforcing bar during the bending of the reinforcement

Чтобы избежать разрушения арматуры в процессе изготовления (гибки арматуры), величина пластической деформации в изогнутом стержне не должна превышать предельных деформаций арматурной стали (ГОСТ 34028-2016) с определенным запасом. Запас должен быть установлен с учетом будущих дополнительных деформаций при наличии внешней нагрузки, ползучести бетона и температурных воздействий на этапе эксплуатации. Предельные деформации зависят от класса и марки стали. Это условие особенно важно соблюдать при использовании арматурных сталей с малой площадью текучести.

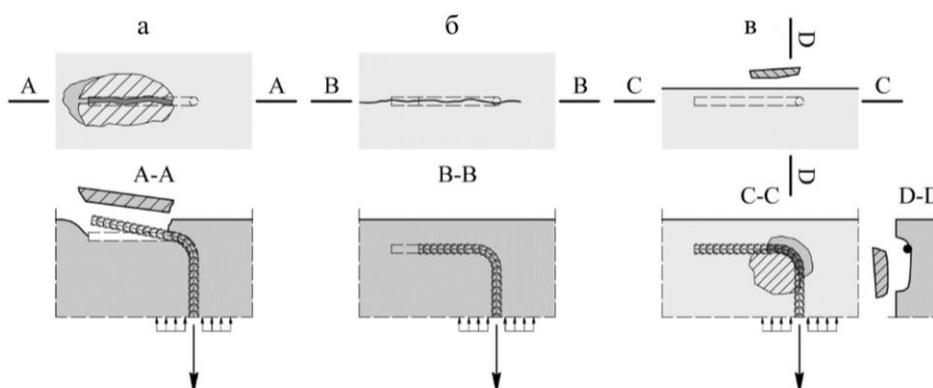


Рис. 2. Разрушение конструкции с применением гнутых стержней:
а, б – разрушение бетона из-за отслоения бетонного покрытия перпендикулярно и параллельно плоскости изгиба; в – проскальзывание арматурного стержня [1]

Fig. 2. Destruction of the structure using bent bars. а, б – destruction of concrete due to peeling of the concrete cover perpendicular and parallel to the bending plane, в – slip of the reinforcing bar

Относительное удлинение ε крайнего волокна может быть определено по известному выражению [6]:

$$\varepsilon = \frac{d}{D+d'} \tag{1}$$

где D и d – диаметры оправки и арматурного стержня соответственно.

Сравнение ограничений минимальных диаметров оправок для загибов арматурных стержней по условию ограничения предельных деформаций (ГОСТ 34028-2016) и рекомендациям в соответствии с (СП 63.13330.2018) приведено для сталей класса А500с (рис. 3), сравнительные диаграммы для сталей других классов имеют аналогичный характер

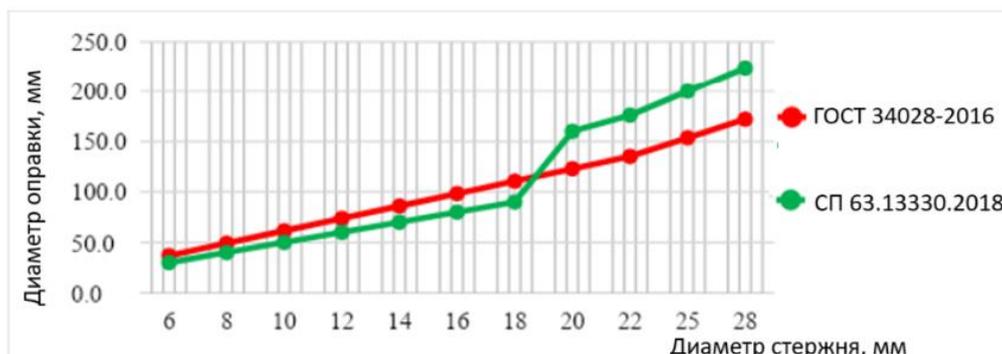


Рис. 3. Минимально допустимые и рекомендуемые диаметры оправок для стержней периодического профиля класса А500с для различных номинальных диаметров изгибаемой арматуры (рисунок выполнен Д.С. Винокуровым)

Fig. 3. Minimum permissible and recommended diameters of mandrel for bars of periodic profile of class A 500c for various nominal diameters of bent armature (drawing by D. Vinokurov)

График, представленный на рис. 3, показывает, что для всех рассматриваемых классов стали арматурных стержней (А240, А400, А500с) при диаметре стержня $d < 20$ мм деформации стали при минимальном диаметре оправки, принимаемом по (СП 63.13330.2018), превышают предельные значения (ГОСТ 34028-2016). Для стержней $d > 20$ мм рекомендуемые минимальные значения диаметров оправки значительно выше, чем рассчитанные в соответствии с выражением (2), и, следовательно, предельные деформации не превышают рекомендуемых значений [6].

Требуемые меньшие значения к диаметрам оправки для стержней из класса стали А240 (по сравнению с требованиями к классам А400, А500) обусловлены большими значениями предельных деформаций стали А240 $\varepsilon = 25\%$, а для сталей А400 и А500с $\varepsilon = 14\%$ и $\varepsilon = 16\%$

соответственно (ГОСТ 34028-2016, ГОСТ Р 52544-2006). Сталь А240 более пластична, поэтому для нее можно использовать оправки меньшего диаметра.

В процессе гибки внешние волокна стержней испытывают растягивающие напряжения. При применении минимального диаметра оправки для арматурных стержней деформации сопоставимы с предельными деформациями арматуры (рис. 3), дополнительные растягивающие напряжения от эксплуатационной нагрузки превысят нормируемые значения предельных деформаций стали. В соответствии с этим в СП 63.13330.2018 имеются рекомендации об использовании в изгибаемых элементах радиусов загиба стержней, равных 10 диаметрам арматурного стержня $r = 10d$ (допускается снижение величины радиуса загиба при условии наличия прямого участка анкеровки до начала загиба стержня). Однако данное требование обобщено для всех типов сталей, нагрузок, диаметров арматурных стержней и классов бетона, что, в свою очередь, может вызывать завышенные требования к радиусам загиба стержней при использовании современных бетонов с повышенной прочностью. В нормативных документах и научных публикациях отсутствуют комплексные методики по определению параметров загиба стержней с учетом перечисленных факторов.

Угол загиба арматурного стержня является одним из основных параметров гнутого стержня. В соответствии с выражением (2) можно сделать вывод, что угол загиба стержней не влияет на диаметр оправки при определении прочности гнутого стержня. Данное предположение подтверждается результатами экспериментов, проведенных в рамках исследований [7, 8].

По результатам экспериментальных данных можно наблюдать, что при загибе стержней предел прочности и предел текучести возрастают (рис. 4, 5), что свидетельствует о превышении деформаций значений предела текучести стали при загибе. Это означает, что сталь становится прочнее, но менее пластичной и более хрупкой. Железобетонные конструкции с арматурными стержнями, деформации которых превышают предел текучести в процессе гибки, разрушаются за короткий промежуток времени без видимых деформаций и иных предшествующих факторов [7–9].

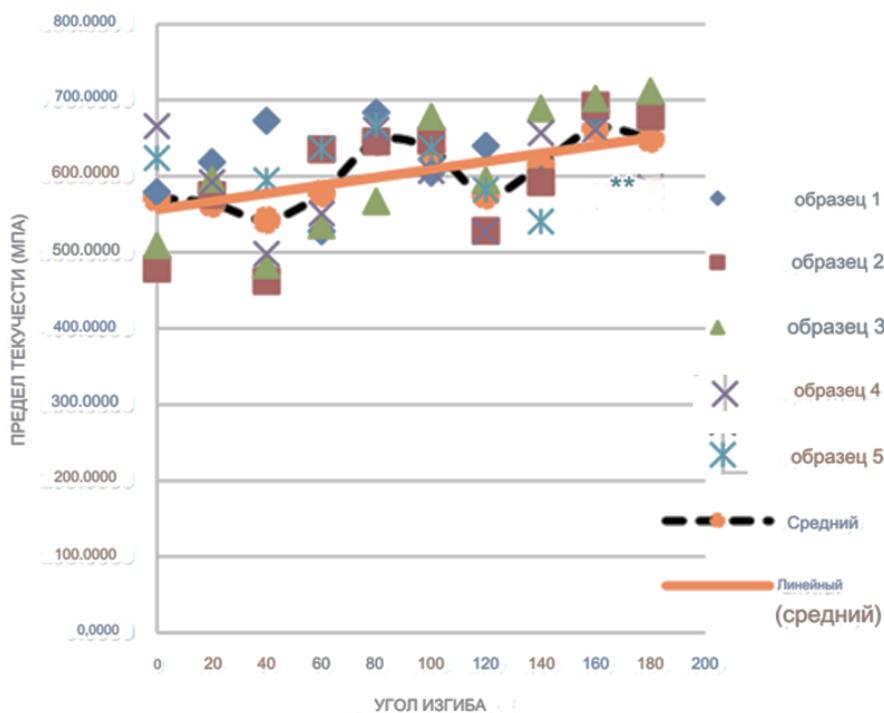


Рис. 4. Зависимость предела текучести стали от угла загиба арматурного стержня [8]

Fig. 4. Dependence of the yield strength of steel on the bending angle of the reinforcing bar

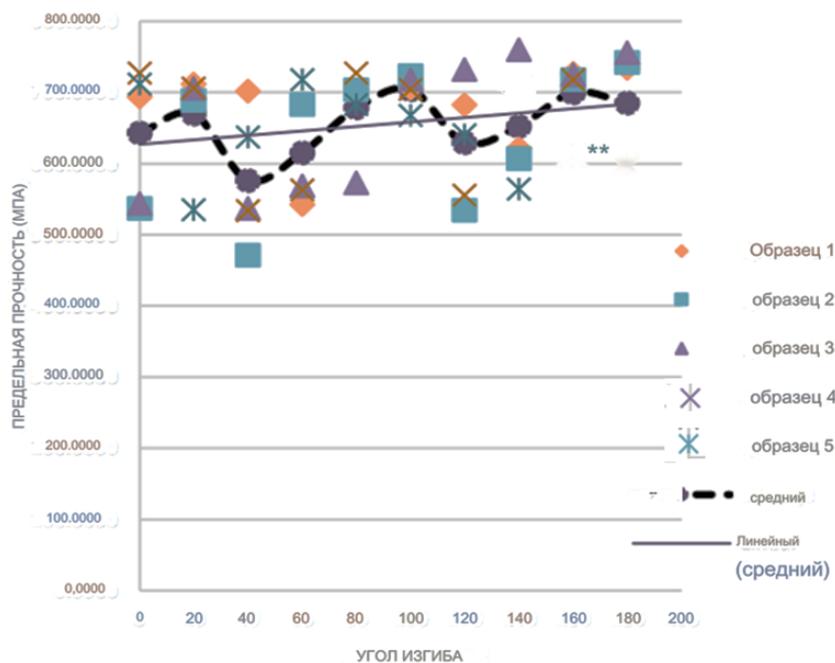


Рис. 5. Зависимость предела прочности стали от угла загиба арматурного стержня [8]

Fig. 5. Dependence of the tensile strength of steel on the bending angle of the reinforcing bar

Периодический профиль, наносимый на поверхность арматуры при ее производстве, является наиболее важным параметром, влияющим на сцепление арматурных стержней с бетоном, и должен обеспечивать приемлемое сочетание таких показателей, как максимальная прочность сцепления, ограничение прогибов и раскрытия трещин, а также минимальный распор, вызывающий откалывание защитного слоя и продольное раскалывание [10]. В отечественной и зарубежной практике изготовления арматурных стержней применяются различные типы профилей: кольцевой, серповидный двусторонний, серповидный четырехсторонний, смешанный.

Влияние типа профиля на работу железобетонных конструкций с применением гнутых арматурных стержней не обозначено в отечественных и зарубежных нормативных документах. Для определения влияния типа профиля арматуры на прочность смятия бетона проведен опытный эксперимент [10]. Определено влияние на смятие бетона двух типов профиля – серповидного и четырехстороннего серповидного (рис. 6).

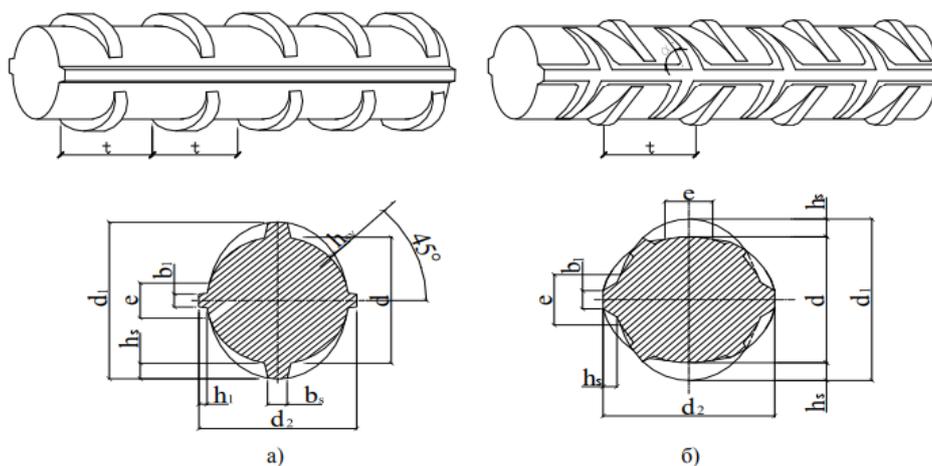


Рис. 6. Виды исследуемых периодических профилей арматуры: а – серповидный профиль, б – четырехсторонний серповидный профиль [10]

Fig. 6. Types of periodic reinforcement profiles under study: а – crescent profile, б – four-sided crescent profile

Установлено, что более равномерное распределение по периметру сечения площади смятия поперечных ребер арматуры с четырехсторонним серповидным периодическим профилем приводит к уменьшению поперечных деформаций бетона и, как следствие, к более равномерному распределению напряжений распора. Однако, как показали опытные данные, имеющаяся разница в поперечном давлении не оказала значительного влияния ни на характер нарушения сцепления с бетоном арматуры исследуемых видов профилей, ни на величину нагрузки, предшествующей моменту разрушения образцов [10].

Помимо разрушения арматурных стержней в процессе гибки и эксплуатации с расположением изогнутого стержня в конструкции имеется опасность *раскалывания бетона* в зоне загиба арматурного стержня при воздействии как нормальных, так и касательных напряжений [5, 11]. Дефект отслаивания инициируется развитием трещины в плоскости изгиба. Эта трещина возникает в области загиба стержня ввиду выталкивания клиновидного объема бетона (рис. 7).

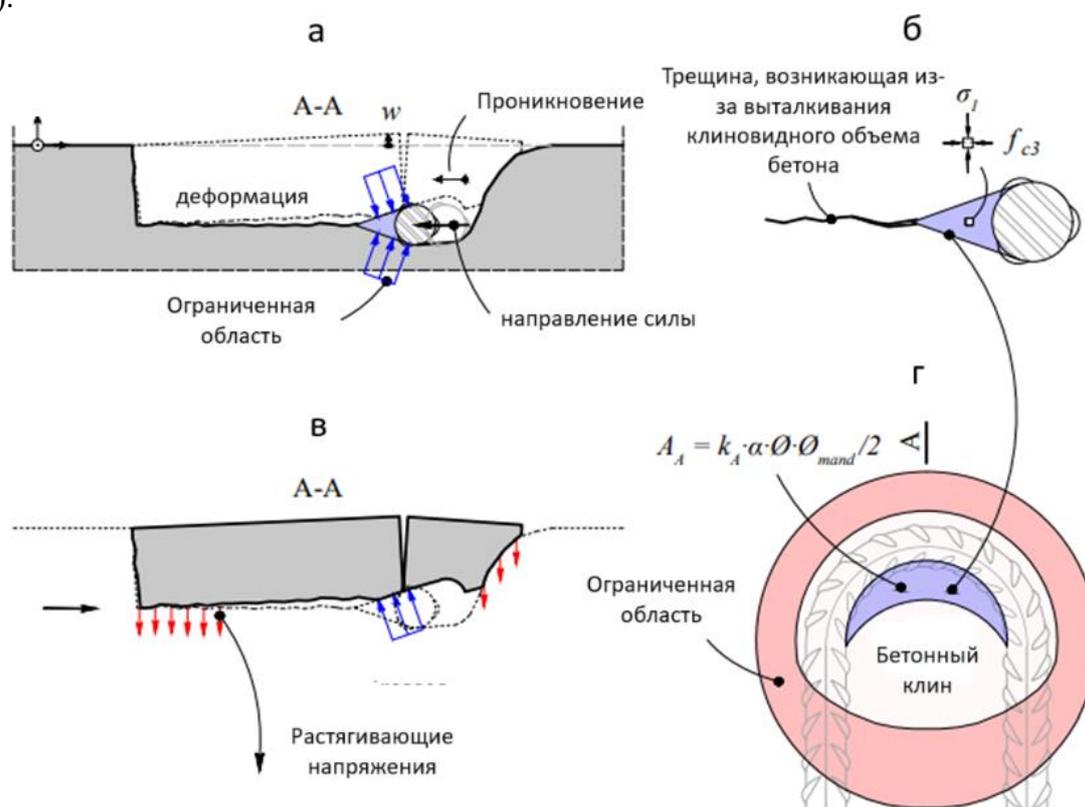


Рис. 7. Схема раскалывания бетона в местах загиба арматурных стержней: а) бетонный клин, образующийся в области загиба стержня; б) форма бетонного клина; в) схема равновесия сил; г) область загиба и ограниченный клин [5]

Fig. 7. The scheme of splitting concrete at the bending points of reinforcing bars. а) a concrete wedge formed in the bend area of the bar, б) the shape of the concrete wedge, в) the balance of forces scheme, г) the bend area and the limited wedge

Клиновидный объем бетона может создавать контактные давления, превышающие прочность бетона на одноосное сжатие. Эти большие контактные напряжения возможны, поскольку эта область ограничена растягивающими силами, развивающимися вне плоскости в области откола [5].

В современных подходах отечественных и зарубежных норм отсутствуют указания по расчету прочности бетона внутри загиба стержней, однако имеются авторские методики расчета таких узлов на основе экспериментальных данных [11]. Анализ данных методик позволяет установить, что прочность соединения зависит от следующих факторов: диаметров опривки и арматурного стержня, прочности бетона на сжатие, защитного слоя, угла загиба стержня (рис. 8).

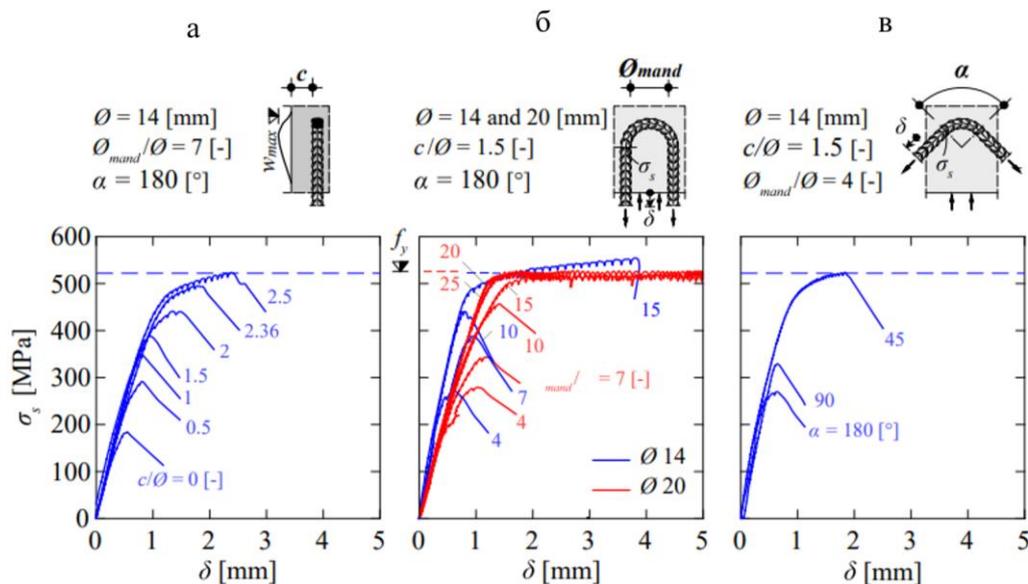


Рис. 8. Графики зависимостей прочности конструкции с гнутыми арматурными стержнями от: а – защитного слоя бетона, б – диаметра оправки, в – угла загиба арматуры [1]

Fig. 8. Graphs of the dependences of the strength of a structure with bent reinforcing bars on: a – the cover ratio of concrete, б – the diameter of the mandrel, в – the angle of bending of the reinforcement

Применение *n*-го количества гнутых стержней в конструкции может оказывать групповое влияние на прочность бетона в местах загибов стержней [11]. Теоретические и экспериментальные исследования о влиянии данного фактора не проведены, однако его необходимо учитывать при расположении стержней на расстоянии меньше приведенного в выражении (2) (рис. 9):

$$\frac{c_{s,lim}}{c} = 1,33 \cdot \left(2 + \frac{\varnothing}{c} \right), \tag{2}$$

где $c_{s,lim}$ – предельное расстояние между гнутыми арматурными стержнями; c – величина защитного слоя, \varnothing – диаметр стержня.

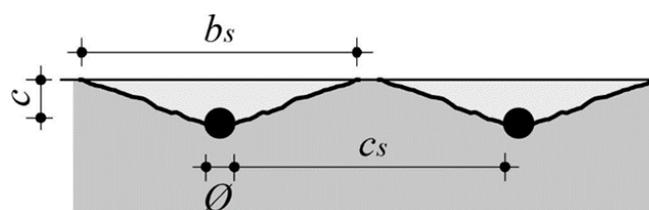


Рис. 9. Схема для учета группового влияния гнутых арматурных стержней [11]

Fig.9. Scheme for accounting for the group effect of bent reinforcing bars

Применяемые на практике станки для гибки арматуры оснащены базовыми роликами диаметром до 150 мм. Следовательно, обеспечение необходимых радиусов загибов стержней (10*d*) в соответствии с требованиями (СП 63.13330.2018) не представляется возможным в рамках массового строительства с точки зрения развития технического потенциала.

На основе дальнейших исследований могут быть разработаны новые подходы к проектированию узлов с применением гнутых арматурных стержней, позволяющие упростить и удешевить процессы производства работ, например, гибка с большим диаметром оправки может быть заменена несколькими изгибами с использованием оправки меньшего размера (рис. 10) [11–13].

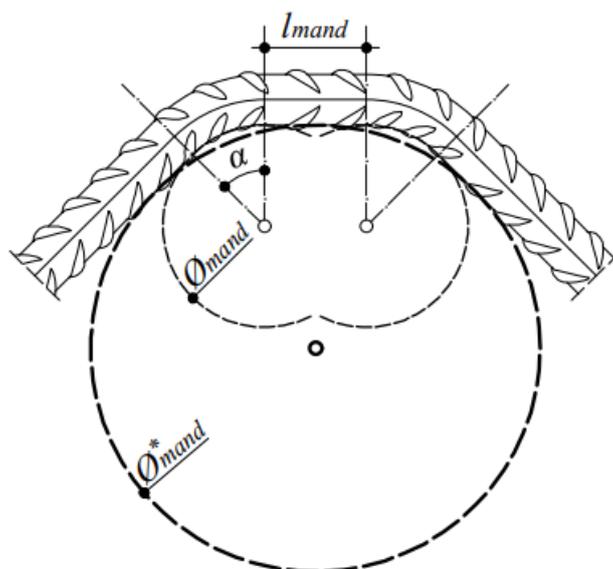


Рис. 10. Загиб арматурного стержня в двух и более точках с применением оправок меньшего диаметра [11]

Fig. 10. Bending of the reinforcing bar at two or more points using mandrels of smaller diameter

Заклучение

По результатам анализа современного состояния вопроса применения гнутых арматурных стержней в железобетонных конструкциях на основе отечественной и зарубежной научно-технической и нормативной литературы сделаны следующие выводы:

- Существующие требования нормативных документов к диаметрам оправок основаны на величине диаметра гнутого стержня, применяемого в конструкции, однако нет указаний о многочисленных факторах (угол загиба стержня, усталостная прочность стали, профиль армирования и т.д.), влияющих на прочность конструкции. А также отсутствуют методики для расчета исходя из условия обеспечения прочности бетона на скалывание.
- Минимальные требования для радиусов (диаметров) загибов стержней сопоставимы с предельными деформациями арматуры соответствующих классов. Наличие эксплуатационных растягивающих напряжений для стержней, согнутых по минимальным требованиям, способствует развитию деформаций, превышающих допустимые значения. Данный фактор необходимо учитывать прежде всего при использовании сталей с малой площадкой текучести.
- Угол загиба стержней не влияет на величину требуемого диаметра оправки при загибах стержней с точки зрения работы арматурного стержня, но оказывает значительное влияние на прочность бетона в местах загибов стержней.
- При загибе стержней предел прочности и предел текучести возрастают, что свидетельствует о превышении деформаций значений предела текучести стали при загибе. Сталь становится прочнее, но менее пластичной и более хрупкой. Данное явление особенно критично в процессе использования конструкции при действии циклических нагрузок.
- Тип профиля поперечного сечения стержней не оказывает значительного влияния на характер разрушения конструкции и предельную нагрузку, воспринимаемую конструкцией.
- Оборудование в условиях массового строительства (при применении роликов гибочного станка диаметром не более 150 мм) не позволяет изготавливать гнутые стержни с соблюдением требований СП 63.13330.2018 ($r = 10d$). Необходимы исследования по применению иных типов гнутых стержней (например, с изгибом стержня

в двух и более точках), а также рассмотрение схем работы гнутых стержней с радиусами загиба в пределах от минимально допустимых до максимально регламентируемых $r = 10d$, поскольку в нормативных документах поведение конструкций в данных диапазонах не рассматривается.

ВКЛАД АВТОРОВ | CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Автор подтверждает ответственность за следующее: разработка концепции и дизайна исследования; сбор данных; анализ и интерпретация результатов; подготовка и редактирование текста.

The author confirms responsibility for the following: study conception and design, data collection, analysis and interpretation of results, and manuscript preparation.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ | CONFLICT OF INTERESTS

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflict of interest.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. ACI 318M-19 Building Code Requirements for Structural Concrete.
2. EN 199211:2004 Eurocode 2: Design of concrete structures. Part 1: General rules and rules for buildings. 225 p.
3. Ajaam A., Darwin D., O'Reilly, M. Anchorage Strength of Reinforcing Bars with Standard Hooks. SM Report No. 125, The University of Kansas Center for Research, Inc., Lawrence, KS, April 2017, 372 p. URL: <https://kuscholarworks.ku.edu/handle/1808/24641> (дата обращения 23.04.2024).
4. Sasaki K., Fujibayashi M., Tona M., Sato A., Hisari Y., Miyagawa T. Investigation of the Cause of Reinforcing Steel Fracture Induced by Alkali-Silica Reaction and Study on Maintenance // Third International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies, Kyoto, Japan, August 18–21, 2013, Tokyo. URL: <http://www.claisse.info/2013%20papers/data/e281.pdf> (дата обращения: 23.04.2024).
5. Monney F., Fernández R.M., Muttoni A. Design against splitting failures in reinforced concrete due to concentrated forces and minimum bend diameter of reinforcement // *Engineering Structures*. 2021. Vol. 245. № 1. P. 23. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112902>
6. Shaposhnikova Y., Kuznetsov V. Reinforcing clamps: stress-strain state of bent reinforcement // E3S Web of Conferences XII International Scientific and Practical Forum Environmentally Sustainable Cities and Settlements: Problems and Solution, Hanoi, Vietnam, April 20–21, 2023, Hanoi. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202340303009>.
7. Mwero J., Ochieng S.O. Residual Strength of Reworked Steel Reinforcement Bars. // *Journal of Scientific and Research Publications*. 2018. Vol. 8. № 6. P. 66–76. <https://doi.org/10.29322/IJSRP.8.6.2018.p7811>.
8. Ikhwan K.S. Effect of Bending and Straightening to the Strength of Reinforcement Steel Bar // The 1st Conference on Ocean, Mechanical and Aerospace, Science and Engineering, Batam, Indonesia, November 18–20, 2014. URL: <https://isomase.org/JOMase/Vol.15%20Jan%202015> (дата обращения 23.04.2024)
9. Barclay L., Kowalsky M. Critical Bending Strain of Reinforcing Steel and Buckled Bar Tension Test // *ACI Materials Journal*. 2019. Vol. 116. № 3. P. 53–61. <https://doi.org/10.14359/51715583>.
10. Хотько А.А. Давление на бетон арматурного стержня с различными видами периодического профиля // *Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В: Прикладные науки. Строительство*. 2008. № 6. С. 49–53. URL: <https://elib.psu.by/handle/123456789/9745> (дата обращения 23.04.2024)
11. Monney F., Yu Q., Fernández R.M., Muttoni A. Anchorage of shear reinforcement in beams and slabs. // *Engineering Structures*. 2022. Vol. 265. No 1. P. 32. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114340>.
12. Domski J., Katzer J., Zakrzewski M. Mechanical characteristics of used bent rebars as a factor limiting their reuse // The 9th International Concrete Conference, Dundee, Great Britain, July 4, 2016, Dundee URL: <https://discovery.dundee.ac.uk/ws/portalfiles/portal/18078009/Proceedings.pdf> (дата обращения 23.04.2024).
13. Warsianto H., Narayudha M. Bending of reinforcing bars testing method and influence on structures. // *TEKNIK*. 2009. Vol. 30, № 2. P. 79–82.

14. Markovich A.S., Kuznetsov V.S., Abu Mahadi M.I., Shaposhnikova Yu. A. *Journal of mechanics of continua and mathematical sciences. Special Issue*. 2019. № 4. P. 78–89
<https://doi.org/10.26782/jmcms.spl.4/2019.11.00009>.

REFERENCES

1. ACI 318M-19 Building Code Requirements for Structural Concrete.
2. EN 199211:2004 Eurocode 2: Design of concrete structures. Part 1: General rules and rules for buildings. 225 p.
3. Ajaam A., Darwin D., O'Reilly M. Anchorage Strength of Reinforcing Bars with Standard Hooks. SM Report No. 125, The University of Kansas Center for Research, Inc., Lawrence, KS, April 2017, 372 p. URL: <https://kuscholarworks.ku.edu/handle/1808/24641> (accessed: April 23, 2024)
4. Sasaki K., Fujibayashi M., Tona M., Sato A., Hisari Y., Miyagawa T. Investigation of the Cause of Reinforcing Steel Fracture Induced by Alkali-Silica Reaction and Study on Maintenance. *Third International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies, Kyoto, Japan, August 18–21, 2013*. URL: <http://www.claisse.info/2013%20papers/data/e281.pdf> (accessed: April 23, 2024)
5. Monney F., Fernández R.M., Muttoni A. Design against splitting failures in reinforced concrete due to concentrated forces and minimum bend diameter of reinforcement. *Engineering Structures*, 2021, vol. 245, no. 1, p. 23. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112902>
6. Shaposhnikova Y., Kuznetsov V. Reinforcing clamps: stress-strain state of bent reinforcement. *E3S Web of Conferences XII International Scientific and Practical Forum Environmentally Sustainable Cities and Settlements: Problems and Solution, Hanoi, Vietnam, April 20–21, 2023*. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202340303009>.
7. Mwero J., Ochieng S.O. Residual Strength of Reworked Steel Reinforcement Bars. *Journal of Scientific and Research Publications*, 2018, vol. 8, no. 6, pp. 66–76. <https://doi.org/10.29322/IJSRP.8.6.2018.p7811>.
8. Ikhwan K.S. Effect of Bending and Straightening to the Strength of Reinforcement Steel Bar. *The 1st Conference on Ocean, Mechanical and Aerospace, Science and Engineering, Batam, Indonesia, November 18–20, 2014*. URL: <https://isomase.org/JOMAsE/Vol.15%20Jan%202015/> (accessed: April 23, 2024)
9. Barcley L., Kowalsky M. Critical Bending Strain of Reinforcing Steel and Buckled Bar Tension Test. *ACI Materials Journal*, 2019, vol. 116, no. 3, pp. 53–61. <https://doi.org/10.14359/51715583>.
10. Hot'ko A.A. Pressure on concrete reinforcement bars with different types of periodic profile. *Vestnik Polockogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya B: Prikladnye nauki. Stroitel'stvo*, 2008, no. 6, pp. 49–53. (In Russ.). URL: <https://elib.psu.by/handle/123456789/9745> (accessed: April 23, 2024)
11. Monney F., Yu Q., Fernández R.M., Muttoni A. Anchorage of shear reinforcement in beams and slabs. *Engineering Structures*, 2022, vol. 265, no. 1, p. 32. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114340>.
12. Domski J., Katzer J., Zakrzewski M. Mechanical characteristics of used bent rebars as a factor limiting their reuse. *The 9th International Concrete Conference, Dundee, Great Britain, July 4, 2016*. URL: <https://discovery.dundee.ac.uk/ws/portalfiles/portal/18078009/Proceedings.pdf> (accessed: April 23, 2024)
13. Warsianto H., Narayudha M. Bending of reinforcing bars testing method and influence on structures. *TEKNIK*, 2009, vol. 30, no 2, pp. 79–82.
14. Markovich A.S., Kuznetsov V.S., Abu Mahadi M.I., Shaposhnikova Yu.A. *Journal of mechanics of continua and mathematical sciences. Special Issue*, 2019, no. 4, pp. 78–89
<https://doi.org/10.26782/jmcms.spl.4/2019.11.00009>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ | INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Винокуров Данил Сергеевич – аспирант, Институт строительства и архитектуры, Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина (Екатеринбург, Российская Федерация)

✉ danil.vinokurov.1999@mail.ru

Danil S. Vinokurov, Postgraduate Student, Institute of Construction and Architecture, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (Yekaterinburg, Russian Federation)

Статья поступила в редакцию / Received: 01.05.2024.

Доработана после рецензирования / Revised: 23.07.2024.

Принята к публикации / Accepted: 20.09.2024