

УДК 624.046.2

**ВЛИЯНИЕ ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ  
НА РАБОТУ ИЗГИБАЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ  
ПРИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ**

**THE INFLUENCE OF PLASTIC STRAINS  
ON THE BEHAVIOR OF BENDING ELEMENTS  
UNDER SEISMIC LOADS**

*С.О. КУРНАВИНА, И.В. ЦАЦУЛИН*

*S.O. KURNAVINA, I.V. TSATSULIN*

**(Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет)**

**(National Research Moscow State University of Civil Engineering)**

E-mail: KurnavinaSO@mgsu.ru; ilya.vladimirovich.t@mail.ru

*Для оценки влияния пластических деформаций в арматуре на напряженно-деформированное состояние и высоту остаточных нормальных трещин в сжатой зоне бетона изгибаемых железобетонных элементов, работающих в условиях малоцикловых знакопеременных воздействий, проведены расчеты моделей шарнирно опертых железобетонных балок с учетом упру-*

*гопластических диаграмм бетона и арматуры. Получена зависимость высоты остаточных трещин, несущей способности и предельного коэффициента пластичности во втором полуцикле нагружения от коэффициента пластичности в первом полуцикле. Сделан вывод о необходимости ограничения пластических деформаций при сейсмических воздействиях во избежание хрупкого разрушения конструкций на последующих циклах нагружения.*

*In order to evaluate the influence of plastic deformations of reinforcement on the stress-strain state of bending elements and on the height of residual cracks in the compressed area of concrete under low-cycle alternating effects the design of reinforced concrete beams with regard to elastoplastic diagrams of materials has been carried out. The dependences of the residual cracks height, bearing capacity, and of the ultimate coefficient of plasticity in the second half-cycle of loading on the coefficient of plasticity in the first half-cycle of loading have been obtained. The conclusion has been made about the necessity of limiting of plastic strains under seismic loads in order to avoid the brittle fracture of constructions during the following cycles of loading.*

**Ключевые слова:** железобетон, знакопеременное воздействие, остаточная трещина, коэффициент пластичности.

**Keywords:** reinforced concrete, alternating loads, residual crack, coefficient of plasticity.

Значительная часть территории Российской Федерации относится к сейсмически опасным районам. В связи с этим возникает необходимость обеспечения сейсмостойкости железобетонных зданий и сооружений, расположенных в этих районах, в том числе и предназначенных для нужд текстильной промышленности.

Процесс развития повреждений в железобетонных конструкциях при сейсмических воздействиях еще недостаточно изучен. Согласно действующим нормам по сейсмостойкому строительству [1] при проектировании зданий и сооружений должно предусматриваться развитие пластических деформаций и локальных разрушений в элементах конструкций. При этом должна быть обеспечена "живучесть" таких зданий во время землетрясений.

В реальной практике проектирования сейсмостойких железобетонных зданий возможность развития пластических деформаций в конструкциях учитывается только на этапе определения сейсмических нагрузок. Большая часть зданий и сооружений рассчитывается спектральным методом, и на-

личие локальных повреждений и пластических деформаций учитывается путем введения понижающего коэффициента  $K_1$ . Расчет железобетонных конструкций на прочность при этом проводится традиционными методами.

Однако развитие пластических деформаций в арматуре, очевидно, приводит к образованию остаточных трещин в растянутой зоне, которые не смыкаются при смене знака усилий [2]. Наличие несомкнутых трещин в сжатой зоне бетона сказывается на напряженно-деформированном состоянии железобетонного сечения на последующих циклах нагружения и, в свою очередь, на несущей способности [2], [4...6].

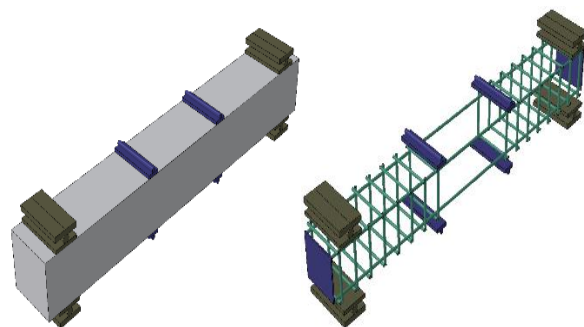


Рис. 1

Для изучения влияния пластических деформаций на работу изгибаемых железобетонных элементов был проведен ряд расчетов железобетонных балок в ПК Abaqus с учетом физической нелинейности материалов. Как показали результаты расчета железобетонных рам на сейсмические воздействия [3], максимальные перемещения наблюдались в течение первых двух полуциклов после достижения максимального ускорения. Поэтому рассматривалось напряженно-деформированное состояние конструкций в течение первых двух полуциклов деформирования изгибаемого элемента.

Целью исследования являлась оценка влияния величины максимальных пластических деформаций в растянутой арматуре на первом полуцикле нагружения на высоту остаточной несомкнутой трещины в сжатой зоне бетона, напряженно-деформи-

рованное состояние, несущую способность и величину предельных пластических деформаций при смене знака усилия. Поскольку изучалась только работа сечения при знакопеременном воздействии, то задача упрощенно решалась в квазистатической постановке. Влияние скорости нагружения на работу материалов учитывалось путем введения коэффициентов динамического упрочнения бетона и арматуры.

Проведены расчеты шарнирно опертой балки из бетона класса В25 с симметричным армированием арматурными стержнями класса А500 на действие двух сосредоточенных сил, передающихся на балку через распределительные пластины 50×200 мм. Модель балки представлена на рис. 1, а основные геометрические характеристики – в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

№ п/п	Образец	$b$ , мм	$h$ , мм	$h_0$ , мм	$A_s$ , см <sup>2</sup>	$A'_s$ , см <sup>2</sup>
1	В0-500-I	150	200	175	1,57	1,57
2	В0-500-II	200	200	175	1,57	1,57
3	В0-500-III	100	200	175	1,57	1,57
4	В0-500-IV	150	250	225	1,57	1,57

Бетон моделировался объемными конечными элементами. Для описания работы бетона использовалась модель с разрушением "concrete damaged plasticity". Данная модель учитывает образование и раскрытие трещин при растяжении, сжатии и срезе, а также теорию прочности бетона. Модель является континуальной, основанной на пластическом поведении и учитывающей образование и накопление повреждений. Ввиду невозможности определения фактической ширины раскрытия трещины, для обеспечения континуальности сетки конечных элементов применяется метод распределения зоны трещины на группу конечных элементов ("размазанное трещинообразование" – smeared cracking). Для наиболее подробной картины трещинообразования в модели, при задании характеристик состояния бетона, после достижения им предельных деформаций, введена ниспадающая ветвь с условным физическим смыслом.

Общий вид расчетной диаграммы для сжатого бетона (concrete damaged plasticity) представлен на рис. 2-а. Общий вид диаграммы для растянутого бетона аналогичен, но отмасштабирован в соответствии с величиной прочности бетона на растяжение и предельными деформациями растяжения.

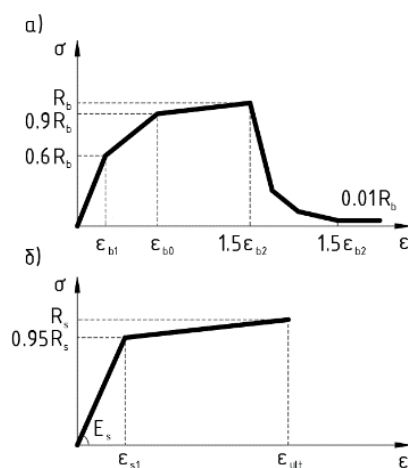


Рис. 2

На рис. 2-б представлена расчетная диаграмма арматуры. Для моделирования арматуры была использована модель пластичности с двумя линейными участками – зоной упругой работы и площадкой текучести, принятой с незначительным упрочнением для обеспечения сходимости.

В качестве эталона рассматривалась балка, загруженная монотонно возрастающей нагрузкой до полного разрушения. Для нее определялась нагрузка, соответствующая началу текучести в арматуре и предельная величина пластических деформаций арматуры в момент начала разрушения бетона сжатой зоны.

Для исследования влияния пластических деформаций арматуры на первом цикле нагружения на напряженно-деформированное состояние при смене знака нагрузки проведены расчеты балок на знакопеременную нагрузку. Вначале балка нагружалась монотонно возрастающей нагрузкой, которая оставалась постоянной после начала текучести в растянутой арматуре. После достижения арматурой заданной величины пластических деформаций балка разгружалась, а затем нагружалась нагрузкой противоположного знака. Коэффициент пластичности по деформациям арматуры в первом полуцикле нагружения варьировался от 1,15 до 5.

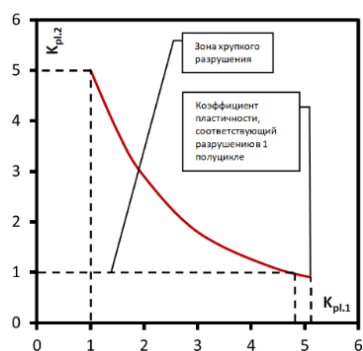


Рис. 3

По результатам расчета строились зависимости предельного коэффициента пластичности, соответствующего разрушению бетона сжатой зоны во втором полуцикле, от коэффициента пластичности в первом полуцикле. На рис. 3 представлена такая за-

висимость для балки В0-500-II. Для эталонной балки коэффициент пластичности, соответствующий началу разрушения бетона сжатой зоны, составил  $K_{pl} = 5,1$ .

Как видно из графика, с увеличением пластических деформаций в первом полуцикле нагружения предельные значения коэффициента пластичности во втором полуцикле интенсивно снижаются. Это связано с ростом высоты остаточной несомкнутой трещины в растянутой зоне, которая при нагружении обратного знака оказывается в сжатой зоне, тем самым уменьшая расчетную высоту сечения. Зависимость относительной высоты несомкнутой трещины в момент начала текучести арматуры во втором полуцикле от коэффициента пластичности в первом полуцикле представлена на рис. 4.

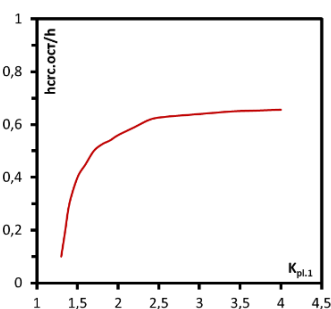


Рис. 4

Как видно из графика на рис. 3, при коэффициенте пластичности в первом полуцикле, равном 4,8, высота сечения во втором полуцикле уменьшается настолько, что сечение оказывается переармированным. Бетон сжатой зоны начинает разрушаться еще до начала текучести в арматуре.

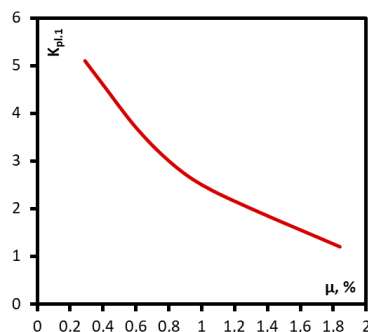


Рис. 5

На рис. 5 представлена зависимость коэффициента пластичности в первом полупериоде нагружения, при котором происходит хрупкое разрушение бетона во втором полупериоде, от процента армирования балки:

$$\mu = \frac{A_s}{b \cdot h_0} = \frac{A'_s}{b \cdot h_0}$$

На рис. 6 представлена зависимость отношения разрушающей нагрузки во втором полупериоде к разрушающей нагрузке эталонного образца в зависимости от коэффициента пластичности в первом полупериоде.

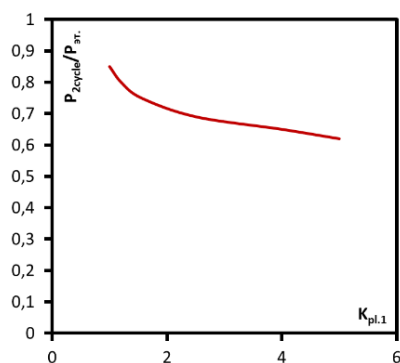


Рис. 6

Из графика видно, что по мере увеличения пластических деформаций в первом полупериоде имеет место значительное (до 40%) снижение несущей способности во втором полупериоде, связанное с уменьшением высоты сечения за счет несомкнутой нормальной трещины в сжатой зоне.

В дальнейшем предполагается выполнение численных расчетов во временной области и испытаний балок на знакопеременное динамическое воздействие.

## ВЫВОДЫ

1. При расчете изгибаемых железобетонных конструкций на сейсмические воздействия следует проводить оценку их прочности не только в момент достижения максимальных деформаций, но и на следующем полупериоде, при воздействии сейсмического усилия обратного знака. При этом необходимо учитывать влияние пластических деформаций на уменьшение высоты сечения при смене знака усилий.

2. Следует ввести критерий предельного состояния, ограничивающий максимальную величину пластических деформаций арматуры, чтобы избежать хрупкого разрушения элемента при воздействии обратного знака.

## ЛИТЕРАТУРА

1. СП 14.13330.2018. Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП II-7-81\*.
2. Курнавина С.О., Грачев А.Н. Критерий образования сквозных трещин при циклическом изгибе железобетонных конструкций // Строительство и реконструкция. – 2018, №5 (79). С 24...31.
3. Garnitsky V.I., Golda Yu.L., Kurnavina S.O. Damage development process in reinforced concrete frame under the action of seismic loads // proceedings of the III All Russian (II International) Conference on concrete and reinforced concrete "Concrete and reinforced concrete – glance at future". – Vol. II, 2014.
4. Абаканов М.С. Малоцикловая прочность железобетонных конструкций каркасных зданий при действии нагрузок типа сейсмических. – Алма-Ата: АО "КазНИИСА", 2016.
5. Курнавина С.О. Циклический изгиб железобетонных конструкций с учетом упругопластических деформаций арматуры и бетона // Вестник МГСУ. – 2011. Т 1. С. 154.
6. Kurnavina S.O., Tsatsulin I.V. The design model of reinforced concrete beam formed by the field of cracks directions // XXII International Scientific Conference: Construction of Living Environment (FORM-2019). – Vol. 97, 2019. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199704017>.
7. Мирсаянов И.Т., Тамразян А.Г. К расчету железобетонных конструкций на выносливость // Промышленное и гражданское строительство. – 2016, № 11. С.19...23.
8. Тамразян А.Г., Орлова М.А. К остаточной несущей способности железобетонных балок с трещинами // Жилищное строительство. – 2015, № 6. С.32...34.
9. Тамразян А.Г., Аветисян Л.А. Экспериментальные исследования внецентренно сжатых железобетонных элементов при кратковременных динамических нагружениях в условиях огневых воздействий // Промышленное и гражданское строительство. – 2014, № 4. С. 2428.

## REFERENCES

1. SP 14.13330.2018. Stroitel'stvo v seysmicheskikh rayonakh. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP II-7-81\*.
2. Kurnavina S.O., Grachev A.N. Kriteriy obrazovaniya skvoznykh treshchin pri tsiklicheskom izgibe zhelezobetonnykh konstruktсий // Stroitel'stvo i rekonstruktsiya. – 2018, №5 (79). S 24...31.

3. Garnitstky V.I., Golda Yu.L., Kurnavina S.O. Damage development process in reinforced concrete frame under the action of seismic loads // proceedings of the III All Russian (II International) Conference on concrete and reinforced concrete "Concrete and reinforced concrete – glance at future". – Vol. II, 2014.

4. Abakanov M.S. Malotsiklovaya prochnost' zhelezobetonnykh konstruksiy karkasnykh zdaniy pri deistvii nagruzok tipa seymicheskikh. – Alma-Ata: AO "KazNIISA", 2016.

5. Kurnavina S.O. Tsiklicheskiy izgib zhelezobetonnykh konstruksiy s uchetom uprugoplasticheskikh deformatsiy armatury i betona // Vestnik MGSU. – 2011. T.1. S. 154.

6. Kurnavina S.O., Tsatsulin I.V. The design model of reinforced concrete beam formed by the field of cracks directions // XXII International Scientific Conference: Construction the Formation of Living Environment (FORM-2019). – Vol. 97, 2019. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199704017>.

7. Mirsayapov I.T., Tamrazyan A.G. K raschetu zhelezobetonnykh konstruksiy na vynoslivost' // Pro-myshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. – 2016, № 11. S.19...23.

8. Tamrazyan A.G., Orlova M.A. K ostatochnoy nesushchey sposobnosti zhelezobetonnykh balok s treshchinami // Zhilishchnoe stroitel'stvo. – 2015, № 6. S.32...34.

9. Tamrazyan A.G., Avetisyan L.A. Eksperimental'nye issledovaniya vnentsentrenno szhatykh zhelezobetonnykh elementov pri kratkovremennykh dinamicheskikh nagruzheniyakh v usloviyakh ognevykh vozdeystviy // Pro-myshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. – 2014, № 4. S.2428.

Рекомендована кафедрой железобетонных и каменных конструкций. Поступила 28.09.19.