

УДК 624.012.46

УТКИН ДМИТРИЙ ГЕННАДЬЕВИЧ, канд. техн. наук, доцент,
udg70@mail.ru

ГРИГОРЬЕВ ДАНИЛ ВИКТОРОВИЧ, магистрант,
killer.hammer@mail.ru

ЗАЙЦЕВ ИЛЬЯ АЛЕКСАНДРОВИЧ, магистрант,
west_mclaren_mercedes@mail.ru

Томский государственный архитектурно-строительный университет,
634003, г. Томск, пл. Соляная, 2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ И ДЕФОРМАТИВНЫХ СВОЙСТВ СТАЛЕФИБРОБЕТОНА ПРИ СТАТИЧЕСКОМ И КРАТКОВРЕМЕННОМ ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИЯХ

Выполнено экспериментальное исследование прочности и деформативности сталефибробетона при сжатии и растяжении путём испытания сталефибробетонных призм и «восьмёрок». В результате экспериментальных исследований получены действительные нелинейные диаграммы деформирования сталефибробетона при сжатии и растяжении. На основе нелинейной деформационной модели разработан метод расчета прочности нормальных и наклонных сечений изгибаемых железобетонных элементов с зонным армированием из стальной фибры при статическом и кратковременном динамическом нагружении. В результате расчетов получены области сопротивления по прочности для таких элементов.

Ключевые слова: сталефибробетон; прочность; деформативность; фибра; статическое нагружение; кратковременное динамическое нагружение.

DMITRIY G. UTKIN, PhD, A/Professor,
udg70@mail.ru

DANIL V. GRIGORIEV, Undergraduate Student,
killer.hammer@mail.ru

ILYA A. ZAYTSEV, Undergraduate Student,
west_mclaren_mercedes@mail.ru

Tomsk State University of Architecture and Building,
2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia

STRENGTH AND DEFORMATION PROPERTIES OF STEEL FIBER CONCRETE UNDER STATIC AND DYNAMIC LOADS

The paper presents the experimental research of strength and deformability of steel fiber concrete under the compression and tension loads. As a result of experimental research, the actual non-linear deformation curves are obtained for the steel fiber reinforced concrete subjected to compression and tension loads. Based on the non-linear deformation model, the strength analysis is provided for normal and oblique planes of bending steel elements with zonal fiber reinforcement under the static and dynamic loads. As a result of strength tests, the resistance areas are identified for such elements.

Keywords: steel fiber concrete; strength; deformability; fiber; static and dynamic loading.

Сталефибробетон – строительный композиционный материал, представляющий собой бетон, армированный стальной фиброй. Исследование характеристик этого материала началось в прошлом веке различными зарубежными и российскими учёными [1–9].

Конструкции здания имеют разное напряженно-деформированное состояние, одним из которых является изгиб. В элементах конструкций целесообразно использовать зонное сталефибровое армирование, тем самым усиливая сжатую либо растянутую зону сечения. Таким образом, использование такого вида армирования может значительно увеличить показатели прочности нормальных, а также наклонных сечений изгибаемых железобетонных элементов при статическом и кратковременном динамическом нагружении.

В рамках исследований для получения прочностных и деформативных характеристик сталефибробетона был проведен ряд стандартных испытаний. Были испытаны шесть сталефибробетонных призм размером 100×100×400 мм, а также сталефибробетонные «восьмерки».

Экспериментальные образцы изготавливались в сборно-разборной опалубке. Изготовление бетонной, а затем и сталефибробетонной смесей производилось вручную в лабораторных условиях. Состав бетонной смеси (по массе): 1,00 (цемент); 0,92 (крупный заполнитель, щебень); 2,47 (мелкий заполнитель, песок). Водоцементное отношение В/Ц принято равным 0,50. Для приготовления бетонной смеси использовался портландцемент марки М400. Расход цемента во всех опытах принимался одинаковым и составлял 460 кг/м³. Крупный заполнитель представлял собой серый щебень крупностью 5–10 мм в количестве 25 % от веса мелкого заполнителя.

Призмы и «восьмёрки» (рис. 1) содержали одинаковый процент зонного фибрового армирования по объёму – 2 %. Для изготовления конструкций применялась фибра, нарезанная из стальной полосы, сечением 0,4×0,6 мм и длиной 40 мм по ТУ 67-987–88.

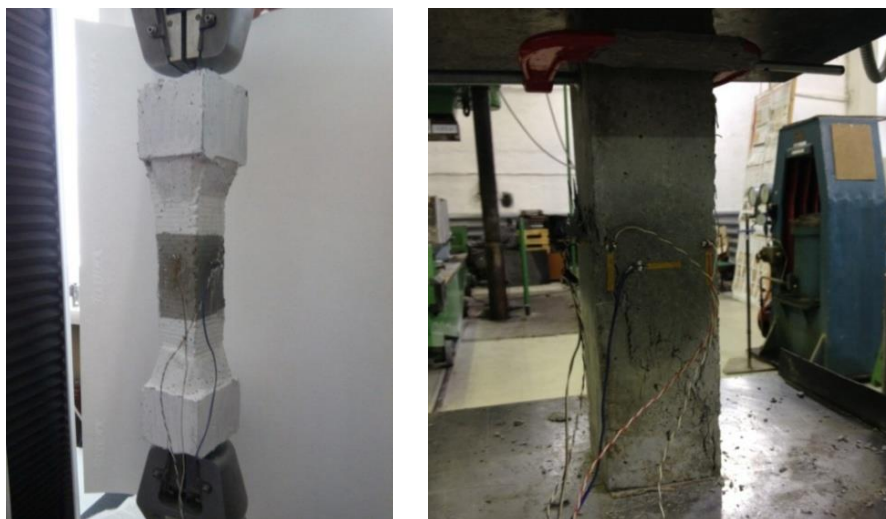


Рис. 1. Общий вид сталефибробетонных «восьмёрки» и призмы

На каждую призму наклеивалось по пять тензорезисторов базой 20 мм типа ПКБ-20 для измерения продольных деформаций и один тензорезистор для измерения поперечных деформаций, а также устанавливался прогибомер для фиксации деформаций бетона (сталефибробетона) после выхода из строя тензорезисторов, наклеенных на поверхность призмы. Применение прогибомера на последних этапах нагружения призм позволило получить нисходящую ветвь диаграммы. На каждую «восьмерку» наклеивалось по три тензорезистора базой 20 мм типа ПКБ-20 для измерения продольных деформаций.

Также деформации сталефибробетонных призм и «восьмёрок» измерялись с использованием цифровой оптической системы Vic3D. В основе системы лежит принцип корреляции цифровых стереоскопических изображений, который позволяет на основе их анализа получить качественную и количественную оценку полей деформаций и перемещений для исследуемой поверхности испытуемого образца.

Система позволяет проводить детальную обработку и анализ полученных данных, в том числе устанавливать виртуальные цифровые экстензометры в произвольных местах полученных изополей, с помощью которых можно получить относительные деформации в характерных зонах поверхности образца.

В результате проведенных испытаний контрольных образцов получены схемы разрушения (рис. 2) и данные с тензорезисторов и прогибомера для сталефибробетона при сжатии на гидравлическом прессе UTM-4500 и на гидравлическом прессе П-250 (рис. 3), а также при растяжении на разрывной машине.

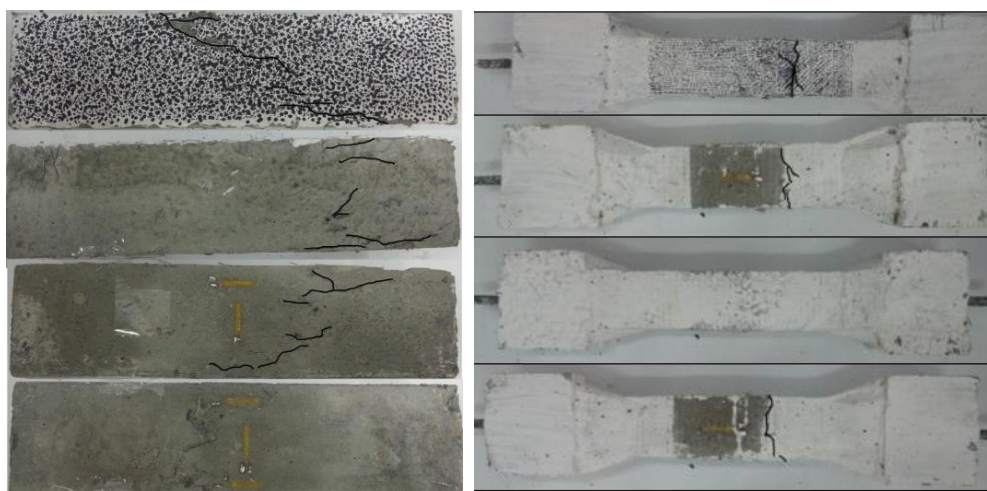


Рис. 2. Схема разрушения и трещинообразования призм и «восьмёрок»

На основании полученных результатов при испытаниях контрольных образцов было установлено, что бетон и сталефибробетон имеют следующие характеристики: $R_{bn} = 18,5$ МПа, $R_{bfn} = 1,6$ МПа, $R_b = 14,5$ МПа, $R_{bf} = 1,05$ МПа, $E_b = 30\,000$ МПа и $R_{fb} = 24,5\text{--}27,8$ МПа, $R_{fbt} = 2,1$ МПа.

Сопоставление результатов испытаний при статическом нагружении сталефибробетонных и бетонных призм и «восьмёрок» представлено на рис. 4 и 5.



Рис. 3. Испытательные прессы:

а – гидравлический пресс П-250; б – гидравлический пресс UTM-4500

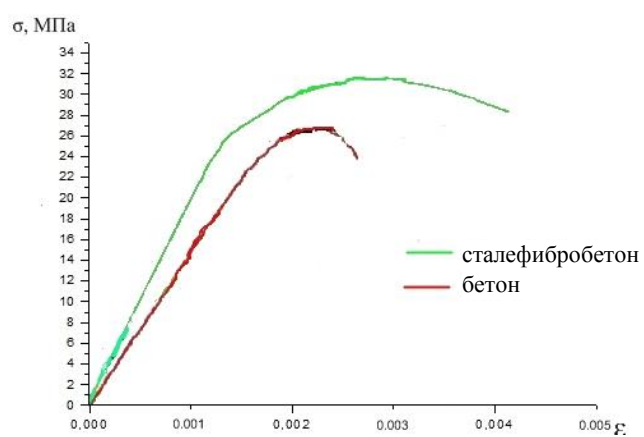


Рис. 4. Диаграмма σ – ϵ при сжатии бетона и сталефибробетона

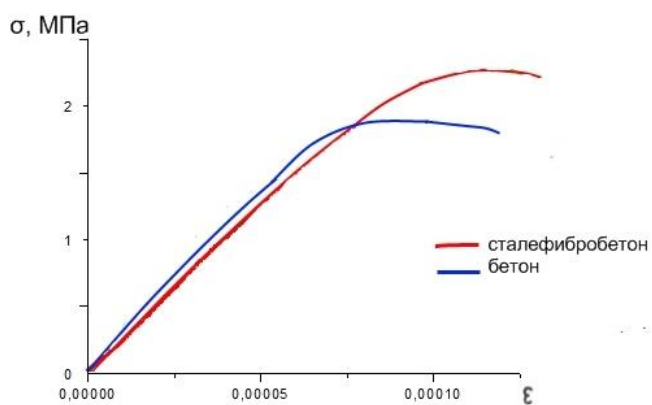


Рис. 5. Диаграмма σ – ϵ при растяжении бетона и сталефибробетона

При этом значения предельных относительных деформаций составили: при сжатии – 0,0025, при растяжении – 0,0001

Исходя из результатов была получена итоговая зависимость σ – ϵ при сжатии и растяжении бетона и сталефибробетона (рис. 6), выступающая в качестве основных предпосылок к расчёту сталефибробетонных элементов, железобетонных элементов с зонным сталефибровым, а также со смешанным армированием.

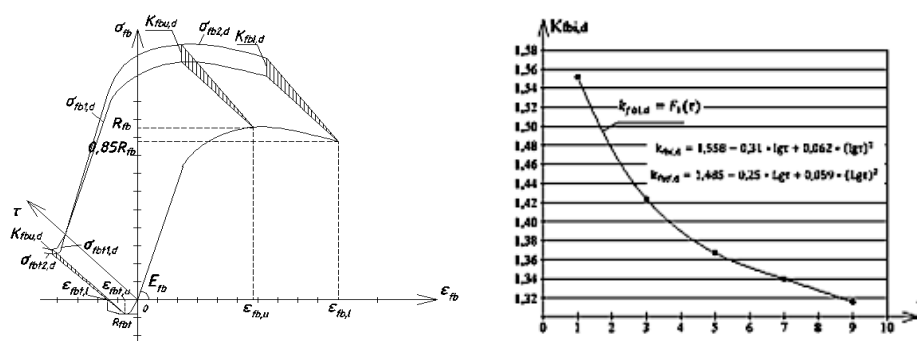


Рис. 6. Диаграмма σ – ϵ при сжатии и растяжении сталефибробетона при кратковременном динамическом нагружении

Современные конструкции ставят перед специалистами множество задач, пути решения которых лежат в составлении правильных расчетных моделей. Во всех областях науки, с различными для каждой из них закономерностями и методами, вычисления опираются на ряд законов или принципов, которые изложены в нормативных источниках.

Основная цель лежит в разработке теоретических основ, выполнении конструктивного расчета и положений теории сталефибробетона с зонным и смешанным армированием. Расчетные схемы наклонных и нормальных сечений представлены на рис. 7–9, а также метод расчета сталефибробетонных элементов сформулирован ниже.

Условие прочности балки с зонным армированием из стальной фибры в приопорных частях на действие поперечной силы:

$$Q(t) \leq \sum_i \frac{\varphi_{b2} \cdot \sigma_{bt}(t) A_b \cdot h_{0b}}{c_0} + \sum_i \frac{\varphi_{b2} \cdot \sigma_{fbt}(t) A_{fb} \cdot \Delta_{fbt}}{c_0} + \sum_i \frac{\varphi_{b2} \cdot \sigma_{fb}(t) A_{fb} \cdot \Delta_{fbt}}{c_0} + \sum_i \frac{\sigma_{sw} \cdot A_{sw}}{s_w}. \quad (1)$$

Расчет наклонных сечений изгибаемых сталефиброжелезобетонных элементов при кратковременном динамическом нагружении производят из условий:

$$\begin{aligned} \epsilon_{b,max} &\leq \epsilon_{b,ult}, \\ \epsilon_{s,max} &\leq \epsilon_{s,ult}, \\ \epsilon_{sc,max} &\leq \epsilon_{sc,ult}, \\ \epsilon_{fbt,max} &\leq \epsilon_{fbt,ult}, \\ \epsilon_{fb,max} &\leq \epsilon_{fb,ult}. \end{aligned} \quad (2)$$

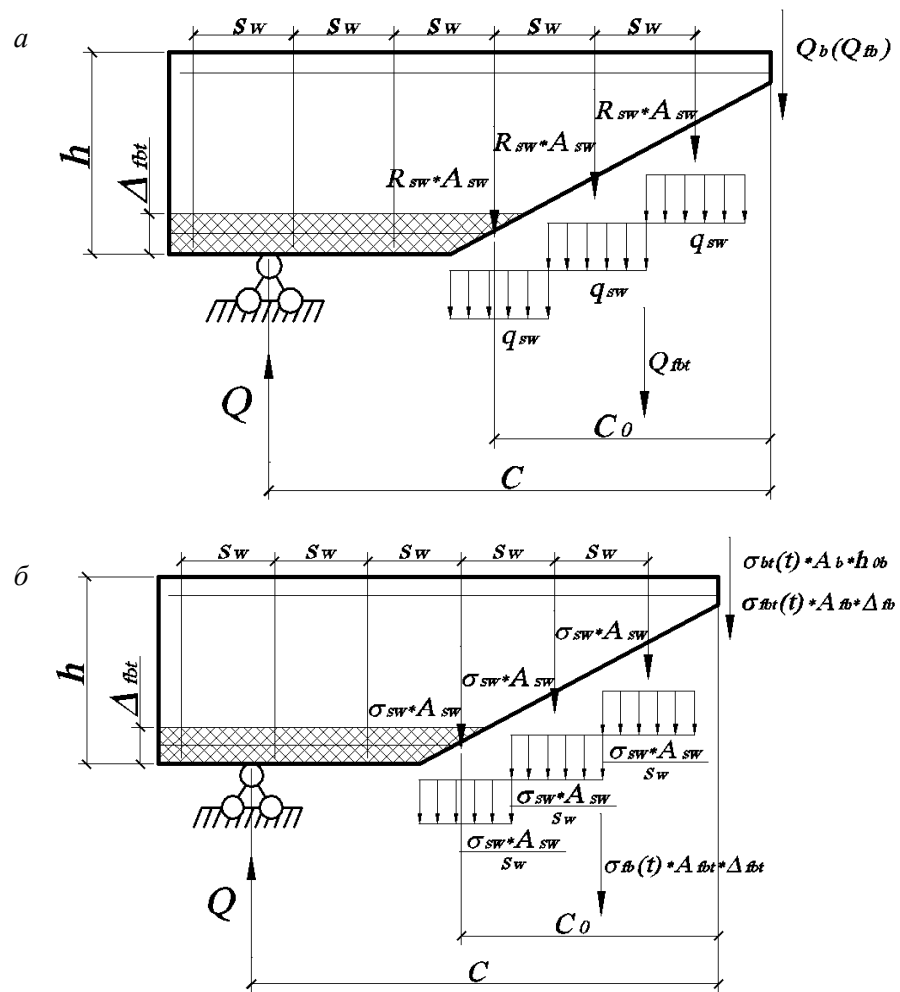


Рис. 7. Расчетные схемы наклонного сечения изгибаемого сталефибробетонного элемента:
а – в абсолютных единицах; б – в относительных единицах

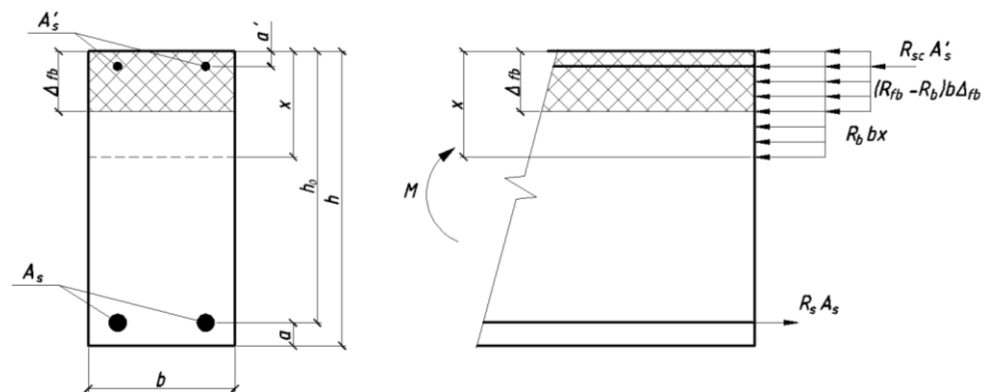


Рис. 8. Расчетная схема нормального сечения изгибаемого сталефибробетонного элемента в абсолютных единицах

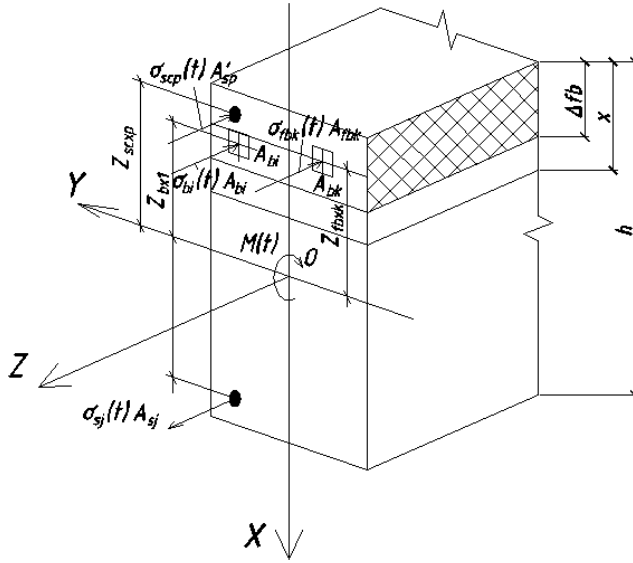


Рис. 9. Расчетная схема нормального сечения изгибаемого железобетонного элемента с зонным армированием в сжатой зоне в относительных единицах

Выражения $\varepsilon_{fbt,max} \leq \varepsilon_{fbt,ult}$, $\varepsilon_{fb,max} \leq \varepsilon_{fb,ult}$ были выделены из работы [8].

Для упрощения расчетов предлагается условие прочности наклонных сечений сталефибробетонного элемента (1) записать в относительных величинах

$$\alpha_q \leq \alpha_{q,b} + \alpha_{q,fb} + \alpha_{q,fbt} + \alpha_{sw}. \quad (3)$$

Условие прочности нормального сечения балки с зонным армированием из стальной фибры:

$$M_{max}(t) \leq M_{ult}(t) = \sum_i \sigma_{bi}(t) A_{bi} Z_{bxi} + \sum_j \sigma_{sj}(t) A_{sj} Z_{sxj} + \sum_k \sigma_{fbk}(t) A_{fbk} \cdot Z_{fbxk} + \sum_p \sigma_{scp}(t) A'_{scp} Z_{scxp}, \quad (4)$$

где A_{bi} , Z_{bxi} , (t) – площадь, координаты центра тяжести i -го участка бетона и напряжение на уровне его центра тяжести; A_{sj} , Z_{sxj} , (t) – площадь, координаты центра тяжести j -го стержня растянутой арматуры и напряжение в нем; A'_{sp} , Z_{scxp} , (t) – площадь, координаты центра тяжести n -го стержня сжатой арматуры и напряжение в нем; A_{fbk} , Z_{fbxk} , (t) – площадь, координаты центра тяжести k -го участка сталефибробетона сжатой зоны сечения и напряжение на уровне его центра тяжести.

Условие прочности (4) в относительных величинах:

$$\alpha_m \leq \alpha_{mb} + \alpha_{ms} + \alpha_{mfb} + \alpha_{msc}, \quad (5)$$

где $\alpha_m = \frac{M(t)}{(R_{b,d} S)}$ – относительный действующий изгибающий момент;

$\alpha_{mb} = \frac{S_b}{S}$ – относительный изгибающий момент, воспринимаемый бетоном сжатой зоны сечения; $\alpha_{ms} = \sum_{j=1}^n \frac{\sigma_{sj}(t) A_{sj} Z_{sj}}{R_{b,d} S}$ – относительный изгибающий момент,

воспринимаемый растянутой арматурой сечения; $\alpha_{mfb} = \sum_{k=1}^n \frac{\sigma_{fbk}(t) A_{fbk} Z_{fbk}}{R_{b,d} S}$ – относительный изгибающий момент, воспринимаемый сталефибробетоном сжатой зоны сечения; $\alpha_{msc} = \sum_{p=1}^p \frac{\sigma_{scp}(t) A'_{sp} Z_{scp}}{R_{b,d} S}$ – относительный изгибающий момент, воспринимаемый сжатой арматурой сечения.

Авторами разработан метод расчета прочности и трещиностойкости изгибаемых и сжато-изогнутых железобетонных элементов с зонным армированием из стальной фибры при статическом и кратковременном динамическом нагружении с использованием областей относительного сопротивления по прочности и трещиностойкости нормальных сечений, позволяющий наглядно оценить запас несущей способности нормального сечения.

Разработанный метод расчета прочности и трещиностойкости сталефиброжелезобетонных элементов реализует деформационную модель с учетом нелинейных диаграмм деформирования бетона, арматуры и сталефибробетона, исходя из их напряженно-деформированного состояния на различных стадиях работы элемента (рис. 10).

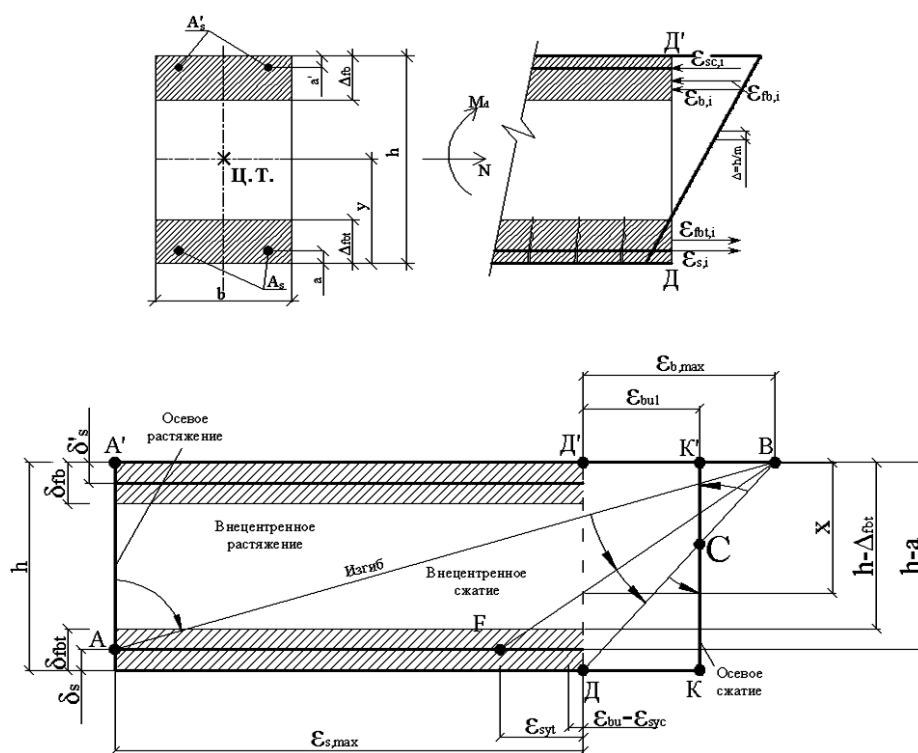


Рис. 10. Расчетная модель, характеризующая последовательность развития деформаций в нормальном сечении сталефиброжелезобетонного элемента в зависимости от вида нагружения

Процесс вычисления внутренних усилий в сталефиброжелезобетонном элементе разбивается на заданное количество этапов, на каждом из которых

определяются значения высоты сжатой зоны бетона (фибробетона), деформаций бетона (сталефибробетона) сжатой зоны сечения, сталефибробетона растянутой зоны сечения, сжатой и растянутой арматуры.

Далее на основании аналитических зависимостей, описывающих диаграммы деформирования бетона, арматуры и сталефибробетона, производится определение напряжений в каждом из этих материалов по вычисленным значениям деформаций. По полученным значениям напряжений осуществляется послойное суммирование усредненных в пределах слоев значений внутренних усилий. В результате определяются предельные относительные продольные усилия и изгибающие моменты, воспринимаемые нормальным сечением, относительно центра тяжести бетонного сечения, которые являются координатами, описывающими область относительного сопротивления по трещиностойкости и прочности нормального сечения сталефиброжелезобетонного элемента при статическом или кратковременном динамическом нагружении. При этом за единичные параметры приняты несущая способность бетонного сечения при сжатии и сжатии с изгибом относительно его центра тяжести. Получаемые при расчетах области относительного сопротивления (рис. 11) позволяют оценить прочность и трещиностойкость сталефиброжелезобетонного элемента при любом сочетании продольных сил и изгибающих моментов.

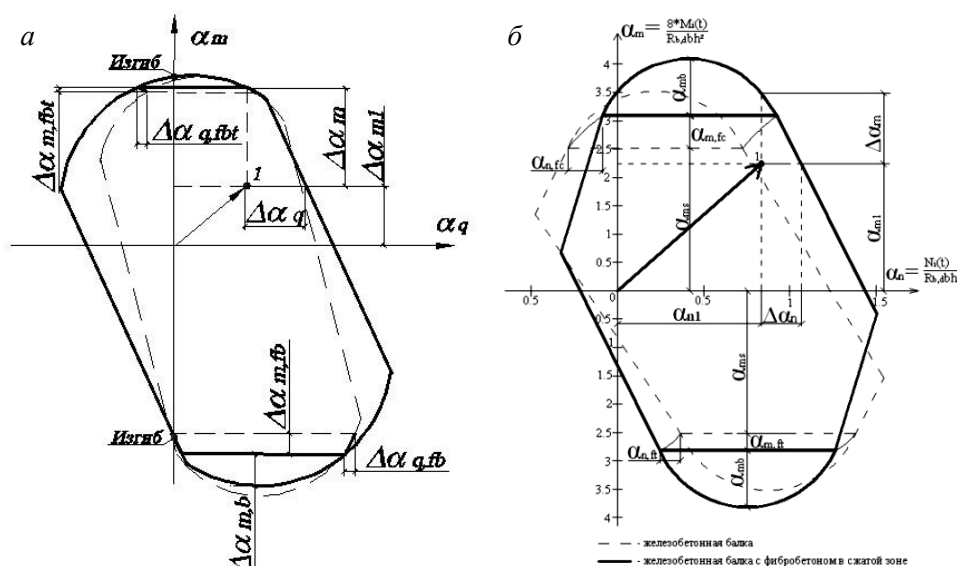


Рис. 11. Область относительного сопротивления по прочности:
 a – наклонного сечения; b – нормального сечения

В ходе настоящей работы были выполнены экспериментальные исследования прочностных и деформативных свойств сталефибробетона при сжатии и растяжении, построены области относительного сопротивления для изгибаемых железобетонных элементов с зонным сталефибровым армированием при кратковременном динамическом нагружении, а также разработан метод расчета прочности и трещиностойкости изгибаемых железобетонных

элементов с зонным армированием из стальной фибры при статическом и кратковременном динамическом нагружениях.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рабинович, Ф.Н. Композиты на основе дисперсно-армированных бетонов. Вопросы теории и проектирования, технология, конструкции / Ф.Н. Рабинович. – М. : Изд-во АСВ, 2004. – 560 с.
2. Григорьев, В.И. Напряженно-деформированное состояние сталефиброжелезобетонных изгибаемых элементов при импульсном воздействии : автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Л., 1986. – 24 с.
3. Морозов, В.И. Эффективность применения фибробетона в конструкциях при динамических воздействиях / В.И. Морозов, Ю.В. Пухаренко // Вестник МГСУ. – 2014. – № 3. – С. 189–196.
4. Уткин, Д.Г. Совершенствование метода расчета прочности сжато-изогнутых железобетонных элементов с зонным армированием из стальной фибры при кратковременном динамическом нагружении : дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 2009. – 183 с.
5. Уткин, Д.Г. Деформирование изгибаемых сталефиброжелезобетонных элементов со смешанным армированием при кратковременном динамическом нагружении / Д.Г. Уткин // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2015. – № 5. – С. 80–89.
6. Морозов, В.И. Исследования фиброжелезобетонных колонн с высокопрочной арматурой / В.И. Морозов, А.О. Хегай // Вестник гражданских инженеров. – 2011. – №3 (28). – С. 34–37.
7. Плевков, В.С. Прочность железобетонных элементов с армированием из стальной фибры при кратковременном динамическом нагружении / В.С. Плевков, Д.Г. Уткин // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2014. – № 5. – С. 38–44.
8. Уткин, Д.Г. Совершенствование метода расчета прочности сжато-изогнутых железобетонных элементов с зонным армированием из стальной фибры при кратковременном динамическом нагружении : автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 2009. – 24 с.
9. *Experimental analysis and modeling of two-way reinforced concrete slabs over different kinds of yielding supports under short-term dynamic loading* / B. Chiaia, O. Kumpyak, L. Placidi [etc.] // *Engineering Structured*. – 2015. – № 96. – P. 88–99.

REFERENCES

1. Rabinovich F.N. Kompozity na osnove dispersno-armirovannykh betonov. Voprosy teorii i projektirovaniya, tehnologiya, konstrukcii [Composites based on fiber concrete. Theory and design, technology, construction]. Moscow: ASV Publ., 2004. 560 p. (rus)
2. Grigoriev V.I. Naprjazhenno-deformirovannoe sostojanie stalefibro-zhelezobetonnykh izgibaemykh elementov pri impul'snom vozdejstvii [The stress-strain state of fiber reinforced concrete bending elements under impulse load. PhD Abstract]. Leningrad, 1986. 24 p. (rus)
3. Morozov V.I., Puharenko Yu.V. Effektivnost' primeneniya fibrobetona v konstrukcijah pri dinamicheskikh vozdeystvijah [The efficiency of fiber reinforced concrete in structures subjected to dynamic loads]. *Scientific and Technical Journal on Construction and Architecture*. 2014. No. 3. Pp. 189–196. (rus)
4. Utkin D.G. Sovershenstvovanie metoda rascheta prochnosti szhato-izognutykh zhelezobetonnykh elementov s zonnym armirovaniem iz stal'noj fibry pri kratkovremennom dinamicheskom nagruzhении [Improvement of strength analysis of compressed-bending reinforced concrete elements with zonal reinforcement of steel fiber under dynamic load. PhD Abstract]. Leningrad, 2009. 24 p. (rus)
5. Utkin D.G. Deformirovanie izgibaemykh stalefibrozhelezobetonnykh jelementov so smeshannym armirovaniem pri kratkovremennom dinamicheskom nagruzhении [Deformation of fiber-reinforced concrete bending elements under dynamic load]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2015. No. 5. Pp. 80–89. (rus)

6. Morozov V.I. Hegai A.O. Issledovaniya fibrozhelezobetonnykh kolonn s vysokoprochnoi armaturoi [Fiber reinforced columns with high-strength reinforcement]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2011. No. 3 (28). Pp. 34–37. (rus)
7. Plevkov V.S., Utkin D.G. Prochnost' zhelezobetonnykh elementov s armirovaniem iz stal'noi fibry pri kratkovremennom dinamicheskom nagruzhении [Strength of reinforced concrete elements with steel fiber reinforcement under dynamic load]. *Seismostoikoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenii*. 2014. No. 5. Pp. 38–44. (rus)
8. Utkin D.G. Sovershenstvovanie metoda rascheta prochnosti szhato-izognutykh zhelezobetonnykh elementov s zonnym armirovaniem iz stal'noi fibry pri kratkovremennom dinamicheskom nagruzhении: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk [Strength analysis improvement for compressed and bending reinforced concrete elements with zonal steel fiber reinforcement under dynamic load. PhD Abstract]. Tomsk, 2009. 24 p. (rus)
9. Chiaia B., Kumpyak O., Placidi L., et al. Experimental analysis and modeling of two-way reinforced concrete slabs over different kinds of yielding supports under short-term dynamic loading. *Engineering Structures*. 2015. No. 96. Pp. 88–99.