МИНИСТЕРСТВО СТРОИТЕЛЬСТВА И ЖКХ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

С В О Д П Р А В И Л СП …. ..2015

КОНСТРУКЦИИ И ИЗДЕЛИЯ ФИБРОБЕТОННЫЕ

ПРАВИЛА ПРОЕКТИРОВАНИЯ

(первая редакция)

Москва 2015

Предисловие

Сведения о своде правил

1 ИСПОЛНИТЕЛИ – НИИЖБ им. А.А. Гвоздева – институт ОАО «НИЦ «Строительство»

2 ВНЕСЕН Техническим комитетом по стандартизации ТК 465 «Строительство»

3 ПОДГОТОВЛЕН к утверждению Департаментом архитектуры, строительства и градостроительной политики

4 УТВЕРЖДЕН приказом Министерства Строительства и ЖКХ Российской Федерации (Минстрой России) от 201…. г. № и введен в действие с … …….. 201… г.

5 ЗАРЕГИСТРИРОВАН Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии (Росстандарт)

6. ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ

В случае пересмотра (замены) или отмены настоящего свода правил соответствующее уведомление будет опубликовано в установленном порядке. Соответствующая информация, уведомление и тексты размещаются также в информационной системе общего пользования – на официальном сайте разработчика (Минстрой России) в сети Интернет

Содержание

Введение

Настоящий свод правил разработан с учетом обязательных требований, установленных в Федеральных законах от 27 декабря 2002 г. № 184-ФЗ «О техническом регулировании», от 30 декабря 2009 г. № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» и содержит требования к расчету и проектированию бетонных и железобетонных конструкций, армированных полимерной фиброй.

Свод правил разработан авторским коллективом НИИЖБ им. А.А. Гвоздева – института АО «НИЦ «Строительство» при участии Объединения юридических лиц «Союз производителей композитов».

С В О Д П Р А В И Л

КОНСТРУКЦИИ И ИЗДЕЛИЯ ФИБРОБЕТОННЫЕ
Правила проектирования

……

Regulation of design

Дата введения – 2016-…-…

1 Область применения

1.1 Настоящие нормы распространяются на проектирование бетонных и железобетонных конструкций зданий и сооружений различного назначения, армированных полимерной фиброй.

1.2 Свод правил устанавливает требования к проектированию фибробетонных конструкций с фиброй из полимерных волокон, изготовляемых из тяжелого и мелкозернистого бетонов, и эксплуатируемых в климатических условиях России при статическом действии нагрузки.

2 Нормативные ссылки

В настоящих нормах использованы ссылки на следующие нормативные документы:

ГОСТ 10180–2012 Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам

ГОСТ 28840 Машины для испытания материалов на растяжение, сжатие и изгиб. Общие технические требования

ГОСТ 31938–2012 Арматура композитная полимерная для армирования бетонных конструкций. Общие технические условия

ГОСТ 32794–2014 «Композиты полимерные. Термины и определения»

ГОСТ Р 54257–2010 Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения

СП 20.13330.2011 «СНиП 2.01.07–85* Нагрузки и воздействия»

СП 63.13330.2012 «СНиП 52-01–2003 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения»

П р и м е ч а н и е – При пользовании настоящим сводом правил целесообразно проверить действие ссылочных стандартов (сводов правил и/или классификаторов) в информационной системе общего пользования – на официальном сайте национального органа Российской Федерации по стандартизации в сети Интернет или по ежегодно издаваемому информационному указателю «Национальные стандарты», который опубликован по состоянию на 1 января текущего года, и по выпускам ежемесячно издаваемого информационного указателя «Национальные стандарты» за текущий год. Если заменен ссылочный стандарт (документ), на который дана недатированная ссылка, то рекомендуется использовать действующую версию этого стандарта (документа) с учетом всех внесенных в данную версию изменений. Если заменен ссылочный стандарт (документ), на который дана датированная ссылка, то рекомендуется использовать версию этого стандарта (документа) с указанным выше годом утверждения (принятия). Если после утверждения настоящего стандарта в ссылочный стандарт (документ), на который дана датированная ссылка, внесено изменение, затрагивающее положение, на которое дана ссылка, то это положение рекомендуется применять без учета данного изменения. Если ссылочный стандарт (документ) отменен без замены, то положение, в котором дана ссылка на него, рекомендуется применять в части, не затрагивающей эту ссылку. Сведения о действии сводов правил можно проверить в Федеральном информационном фонде технических регламентов и стандартов.

3 Термины и определения

В настоящем своде правил применяют термины по ГОСТ 32794, ГОСТ 31938 и по другим нормативным документам, на которые имеются ссылки, а также следующие термины с соответствующими определениями:

3.1 **фибробетон:** Бетон, армированный равномерно распределенными в его объеме полимерными фибрами, имеющими сцепление с бетоном по их поверхности.

3.2 **фибробетонные конструкции:** Конструкции из фибробетона без стержневой арматуры или с рабочей (в том числе предварительно напряженной) и/или конструктивной стержневой арматурой.

3.3 **процент фибрового армирования по массе**: Отношение массы фибр, содержащихся в единице объема фибробетона, к массе этой единицы объема в процентах.

3.4 **коэффициент фибрового армирования по объему**: Относительное содержание объема фибр в единице объема фибробетона.

4 Общие требования

4.1 Фибробетон с фиброй из полимерных волокон рекомендуется применять для изготовления конструкций, в которых эффективно могут быть использованы следующие его характеристики:

- повышенные трещиностойкость, ударная прочность, вязкость разрушения, износостойкость, морозостойкость, сопротивление кавитации;
- пониженные усадка и ползучесть.

4.2 Фибробетонные конструкции без арматуры рекомендуется применять в случае их преимущественной работы:

- на сжатие при расположении продольной сжимающей силы в пределах поперечного сечения элемента;
- на сжатие при расположении продольной сжимающей силы за пределами поперечного сечения элемента и на изгиб – в случаях, когда их разрушение не представляет непосредственной опасности для жизни людей, исправности и сохранности оборудования.

В остальных случаях рекомендуется применять фибробетонные конструкции с рабочей арматурой.

4.3 Содержание композитной полимерной фибры в единице объема фибробетона следует назначать в соответствии с требованиями к его физико-механическим свойствам, назначаемым из условий применения и требований настоящего свода правил.

4.4 В рабочих чертежах фибробетонных конструкций следует указывать маркировку фибры и ее требуемое содержание (объем фибры) в 1 $м^3$ фибробетонной смеси, классы и марки фибробетона (в том числе и класс по остаточной прочности на растяжение при изгибе), а в случае необходимости – приводить требования к технологическим приемам изготовления, обеспечивающим требуемые свойства фибробетона.

4.5 Расчеты фибробетонных конструкций следует проводить по предельным состояниям первой и второй групп.

4.6 Расчеты по предельным состояниям первой группы включают:

- расчет по прочности;
- расчет по устойчивости формы (для тонкостенных конструкций);
- расчет по устойчивости положения (опрокидывание, скольжение, всплывание).

4.7 Расчеты по предельным состояниям второй группы включают:

- расчет по образованию трещин;
- расчет по раскрытию трещин;
- расчет по деформациям.

4.8 При расчетах фибробетонных конструкций по предельным состояниям следует рассматривать различные расчетные ситуации в соответствии с ГОСТ Р 54257, в том числе стадии изготовления, транспортирования, возведения, эксплуатации, аварийные ситуации, а в необходимых случаях – пожар.

4.9 Расчеты фибробетонных конструкций следует производить на все виды нагрузок, отвечающих функциональному назначению конструкций, с учетом влияния окружающей среды, а в необходимых случаях – с учетом воздействия пожара, технологических температурных и влажностных воздействий и воздействий агрессивных химических сред.

4.10 Расчеты фибробетонных конструкций следует производить на действие изгибающих моментов, продольных сил, поперечных сил и крутящих моментов, а также на местное действие нагрузки.

4.11 При расчете сборных фибробетонных конструкций на воздействие усилий, возникающих при их подъеме, транспортировании и монтаже, нагрузку от их массы следует принимать с коэффициентом динамичности, равным:

- 1,60 – при транспортировании;
- 1,40 – при подъеме и монтаже.

Допускается принимать более низкие, обоснованные в установленном порядке, значения коэффициентов динамичности, но не ниже 1,25.

4.12 При расчетах конструкций следует учитывать особенности свойств различных видов фибробетона и арматуры, влияния на них характера нагрузки и окружающей среды, способов армирования, совместность работы арматуры и фибробетона.

4.13 Расчеты по устойчивости формы конструкции, а также по устойчивости положения следует производить согласно указаниям нормативных документов на отдельные виды конструкций.

4.14 Расчет по прочности фибробетонных конструкций следует производить:

- по нормальным сечениям (при действии изгибающих моментов и продольных сил);
- по наклонным сечениям (при действии поперечных сил);
- по пространственным сечениям (при действии крутящих моментов);
- на местное действие нагрузки (местное сжатие, продавливание).

5 Материалы

5.1 Нормативные и расчетные характеристики стальной арматуры

5.1.1 Нормативные и расчетные значения характеристик стальной арматуры, а при расчете конструкций по нелинейной деформационной модели – диаграммы ее деформирования, следует принимать по СП 63.13330.

5.2 Нормативные и расчетные характеристики фибробетона

5.2.1 Для фибробетонных конструкций, проектируемых в соответствии с требованиями настоящего свода правил, в качестве бетона-матрицы следует использовать следующие конструкционные бетоны:

- тяжелый средней плотности от 2200 до 2500 кг/м^3;
- мелкозернистый средней плотности от 1800 до 2200 кг/м^3.

5.2.2 Основными нормируемыми и контролируемыми показателями качества фибробетона являются:

- класс по прочности на сжатие B_f;
- класс по прочности на осевое растяжение B_{ft} ;
- класс по остаточной прочности на растяжение при изгибе B_{fbt};
- марка по морозостойкости F;
- марка по водонепроницаемости W.

5.2.3 Класс фибробетона по прочности на сжатие B_f соответствует значению кубиковой прочности фибробетона на сжатие, МПа, с обеспеченностью 0,95 (нормативная кубиковая прочность).

Класс фибробетона по прочности на осевое растяжение B_{ft} соответствует значению прочности бетона на осевое растяжение, МПа, с обеспеченностью 0,95 (нормативная прочность бетона).

Класс фибробетона по остаточной прочности на растяжение при изгибе B_{fbt} соответствует значению остаточной прочности фибробетона на растяжение при изгибе, МПа, с обеспеченностью 0,95 (нормативная прочность бетона).

Марка фибробетона по морозостойкости F соответствует минимальному числу циклов переменного замораживания и оттаивания, выдерживаемых образцом при стандартном испытании.

Марка фибробетона по водонепроницаемости W соответствует максимальному значению давления воды (в МПа$\cdot 10^{-1}$), выдерживаемому фибробетонным образцом при испытании.

Классы фибробетона по прочности на сжатие и по прочности на осевое растяжение назначают по результатам испытаний контрольных образцов в соответствии с ГОСТ 10180. Допускается класс фибробетона по прочности на осевое растяжение

назначать по результатам испытаний контрольных образцов-балок на изгиб в соответствии с приложением Б.

Класс фибробетона по остаточной прочности на растяжение при изгибе B_{fbt} назначают с указанием подкласса «a», «b», «c», «d» или «e» по результатам испытаний контрольных образцов-балок на изгиб в соответствии с приложением Б.

Классы фибробетона по прочности на сжатие B_f , по прочности на осевое растяжение B_{ft} и по остаточной прочности на растяжение при изгибе B_{fbt} (с указанием подкласса) назначают для всех видов фибробетонов и конструкций.

Марку фибробетона по морозостойкости F назначают для конструкций, подвергающихся воздействию переменного замораживания и оттаивания.

Марку фибробетона по водонепроницаемости W назначают для конструкций, к которым предъявляют требования по ограничению водопроницаемости.

При назначении класса фибробетона по остаточной прочности на растяжение при изгибе B_{fbt} нормативные значения сопротивления растяжению при изгибе $R_{fbt,n}$ принимают равными числовой характеристике класса фибробетона по прочности на растяжение при изгибе.

5.2.4 Для фибробетонных конструкций следует предусматривать классы фибробетона по прочности на сжатие, классы фибробетона по прочности на осевое растяжение и марки фибробетона, принятые в СП 63.13330 для обычного тяжелого и мелкозернистого бетонов, и классы по остаточной прочности на растяжение при изгибе, приведенные в таблице 1.

Таблица 1 – **Классы фибробетона по остаточной прочности на растяжение при изгибе**

Вид бетона	Классы фибробетона по остаточной прочности на растяжение при изгибе
Тяжелый и мелкозернистый бетоны	B_{fbt}1i; B_{fbt}1,5i; B_{fbt}2i; B_{fbt}2,5i; B_{fbt}3i; B_{fbt}3,5i; B_{fbt}4i; B_{fbt}4,5i; B_{fbt}5i; B_{fbt}5,5i; B_{fbt}6i; B_{fbt}6,5i; B_{fbt}7i; B_{fbt}7,5i; B_{fbt}8i (i = «a», «b», «c», «d» или «e» – индекс подкласса)

5.2.6 Основными прочностными характеристиками бетона являются нормативные значения:

- сопротивления бетона осевому сжатию $R_{fb,n}$;
- сопротивления бетона осевому растяжению $R_{ft,n}$;
- остаточного сопротивления растяжению при изгибе $R_{fbt,n.}$и $R_{fbt3,n.}$.

5.2.7 Нормативные значения сопротивления бетона осевому сжатию (призменная прочность) принимают равными их значениям для принятого класса бетона-матрицы, установленными в СП 63.13330.

При назначении класса фибробетона по остаточной прочности на растяжение при изгибе B_{fbt} нормативные значения сопротивления растяжению при изгибе $R_{fbt,n}$ принимают равными числовой характеристике класса фибробетона по остаточной прочности на растяжение при изгибе. Числовая характеристика класса фибробетона по остаточной прочности на растяжение при изгибе характеризует гарантированную прочность фибробетона на растяжение при изгибе $R_{F0.5,n}$, с обеспеченностью 0,95, соответствующую значению перемещений внешних граней надреза 0,5 мм при испытаниях на изгиб (см. приложение Б).

Расчетные значения сопротивления растяжению при изгибе R_{ftb} и остаточного сопротивления растяжению при изгибе R_{ftb3} определяют по формулам:

$$R_{fbt} = \frac{R_{fbt,n}}{\gamma_{ft}}, \quad (5.1)$$

$$R_{fbt3} = \frac{R_{fbt3,n}}{\gamma_{ft}}. \quad (5.2)$$

Значение коэффициента надежности по фибробетону при растяжении γ_{ft} принимают равным:

- 1,5 – для расчета по предельным состояниям первой группы при назначении класса бетона по прочности на сжатие;

- 1,3 – для расчета по предельным состояниям первой группы при назначении класса бетона по прочности на растяжение.

Расчетные значения сопротивления фибробетона R_{fb} и $R_{fb,ser}$ в зависимости от класса фибробетона по прочности на сжатие для предельных состояний первой и второй группы принимают как для обычного бетона по СП 63.13330.

Расчетные значения сопротивления фибробетона растяжению при изгибе R_{fbt} и $R_{fbt,ser}$ и остаточного сопротивления растяжению при изгибе R_{fbt3} и $R_{fbt3,ser}$ в зависимости от подкласса «a», «b», «c», «d» и «e» для предельных состояний первой и второй групп приведены в таблице 2.

5.2.8 В необходимых случаях расчетные значения прочностных характеристик фибробетона умножают на коэффициенты условий работы γ_{bi}, учитывающие особенности работы бетона в конструкции (характер нагрузки, условия окружающей среды и т. д.):

а) γ_{b1} – коэффициент, вводимый к расчетным значениям сопротивлений R_{fb} и R_{fbt}, и учитывающий влияние длительности действия статической нагрузки R_{ft}:

- γ_{b1} = 1,0 при непродолжительном (кратковременном) действии нагрузки;

- γ_{b1} = 0,9 при продолжительном (длительном) действии нагрузки;

б) γ_{b2} – коэффициент, вводимый для фибробетонных конструкций без стержневой рабочей арматуры к расчетным значениям сопротивления R_{fb} и учитывающий характер разрушения таких конструкций: γ_{b2} = 0,9;

в) γ_{b3} – коэффициент, вводимый для фибробетонных конструкций, бетонируемых в вертикальном положении при высоте слоя бетонирования свыше 1,5 м, к расчетному значению сопротивления бетона R_{fb}: γ_{b3} = 0,85;

г) γ_{b5} – коэффициент условий работы фибробетонных конструкций, учитывающий влияние попеременного замораживания и оттаивания, а также отрицательных температур:

- γ_{b5} = 1,0 для надземных конструкций, подвергаемых атмосферным воздействиям окружающей среды при расчетной температуре наружного воздуха в холодный период минус 40 °С и выше;

- в других случаях $\gamma_{b5} \leq 1,0$ и его значение принимают в зависимости от назначения конструкции и условий окружающей среды по специальным указаниям.

5.2.9 Основными деформационными характеристиками фибробетона являются значения:

- предельных относительных деформаций фибробетона при осевом сжатии и растяжении (при однородном напряженном состоянии бетона) ε_{fb0} и ε_{ft0};

- начального модуля упругости E_{fb};

- модуля сдвига G;

- коэффициента (характеристики) ползучести $\varphi_{b,cr}$;

- коэффициента поперечной деформации фибробетона (коэффициента Пуассона) $\nu_{b,P}$;

- коэффициента линейной температурной деформации фибробетона α_{bt}.

Значения основных деформационных характеристик фибробетона при осевом сжатии принимают как обычного бетона по СП 63.13330.

Таблица 2

Характеристика		Нормативные $R_{fbt,n}$ и $R_{fbt3,n}$, расчетные для предельных состояний второй группы $R_{fbt,ser}$ и $R_{fbt3,ser}$ и расчетные для предельных состояний первой группы R_{fbt} и R_{fbt3} значения сопротивления фибробетона растяжению при изгибе при классе фибробетона по остаточной прочности на растяжение при изгибе (МПа)														
		$B_{fbt}1i$	$B_{fbt}1{,}5i$	$B_{fbt}\ 2i$	$B_{fbt}2{,}5i$	$B_{fbt}\ 3i$	$B_{fbt}3{,}5i$	$B_{fbt}\ 4i$	$B_{fbt}4{,}5i$	$B_{fbt}\ 5i$	$B_{fbt}5{,}5i$	$B_{fbt}\ 6i$	$B_{fbt}6{,}5i$	$B_{fbt}\ 7i$	$B_{fbt}7{,}5i$	$B_{fbt}\ 8i$
$R_{fbt,n}$ и $R_{fbt,ser}$		1,00	1,50	2,00	2,50	3,00	3,50	4,00	4,50	5,00	5,50	6,00	6,50	7,00	7,50	8,00
$\frac{R_{fbt3,n}}{R_{fbt,n}}$; $(\frac{R_{fbt3,ser}}{R_{fbt,ser}})$	$i=a$	0,50														
	$i=b$	0,70														
	$i=c$	0,90														
	$i=d$	1,10														
	$i=e$	1,30														
R_{fbt}		0,67	1,00	1,33	1,67	2,00	2,33	2,67	3,00	3,33	3,67	4,00	4,33	4,67	5,00	5,33
$\frac{R_{fbt3}}{R_{fbt}}$	$i=a$	0,50														
	$i=b$	0,70														
	$i=c$	0,90														
	$i=d$	1,10														
	$i=e$	1,30														

5.2.9 В качестве рабочих диаграмм деформирования фибробетона при осевом сжатии, определяющих связь между напряжениями и относительными деформациями, принимают криволинейные, в том числе с ниспадающей ветвью и упрощенные трехлинейную или двухлинейную диаграммы. Параметрические точки рабочих диаграмм сжатого фибробетона принимают как для обычного бетона по СП 63.13330, а сжимающие напряжения бетона σ_{fb} в зависимости от относительных деформаций укорочения бетона ε_{fb} определяют по формулам, указанным в СП 63.13330.

В качестве рабочих диаграмм деформирования фибробетона при растяжении принимают упрощенную трехлинейную диаграмму (см. рисунок 1). Растягивающие напряжения бетона σ_b в зависимости от относительных деформаций укорочения бетона ε_{fbt} определяют по формулам:

при $0 \le \varepsilon_{fbt} \le \varepsilon_{fbt0}$

$$\sigma_{fbt\,b} = E_{fbt,red} \cdot \varepsilon_{fbt}\,, \tag{5.3}$$

при $\varepsilon_{fbt0} < \varepsilon_{fbt} < \varepsilon_{fbt2}$

$$\sigma_{fbt} = k \cdot R_{fbt}, \tag{5.4}$$

при $\varepsilon_{fbt2} \le \varepsilon_{fbt} \le \varepsilon_{fbt3}$

$$\sigma_{fbt} = R_{fbt}\left[1-\left(1-\frac{R_{fbt3}}{R_{fbt}}\right)\cdot\frac{\varepsilon_{fbt}-\varepsilon_{fbt2}}{\varepsilon_{fbt3}-\varepsilon_{fbt2}}\right], \tag{5.5}$$

где $E_{fbt,red}$ – приведенный модуль деформаций фибробетона при растяжении:

$$E_{fbt,red} = \frac{k \cdot R_{fbt}}{\varepsilon_{fbt0}}, \tag{5.6}$$

здесь R_{fbt} и $\frac{R_{fbt3}}{R_{fbt}}$ – характеристики сопротивления фибробетона растяжению при изгибе, принимаемые по таблице 2;

ε_{fbt0}, ε_{fbt2} и ε_{fbt3} – относительные деформации, принимаемые равными:

ε_{fbt0} = 0,0001;

ε_{fbt2} = 0,0035;

ε_{fbt3} = 0,02 – при $\frac{R_{fbt3}}{R_{fbt}} < 1$ (см. рисунок 1, а);

ε_{fbt3} = 0,01 – при $\frac{R_{fbt3}}{R_{fbt}} \ge 1$ (см. рисунок 1, б).

Значение коэффициента *k* в формулах (5.4) и (5.6) следует принимать равным 0,56.

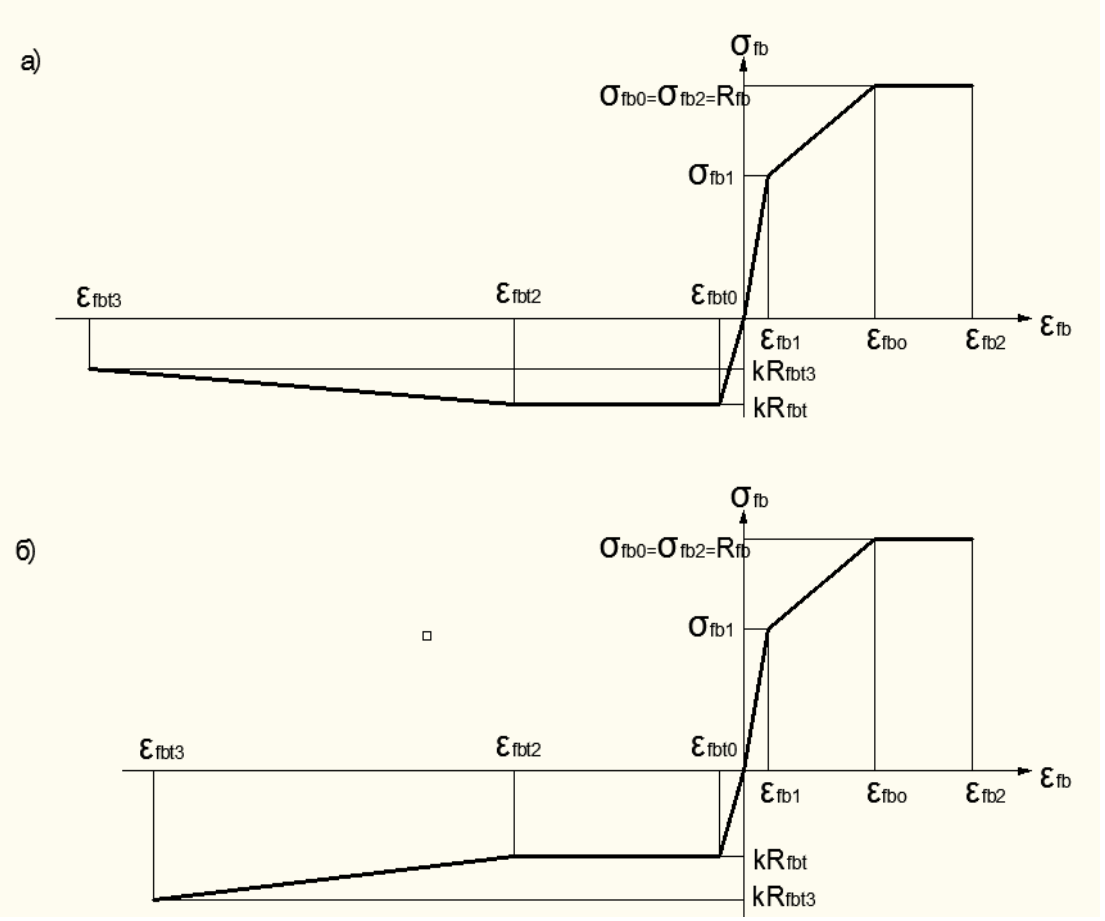


***Рисунок 1* – Трехлинейные диаграммы деформирования фибробетона при сжатии и растяжении**

6 Фибробетонные конструкции без предварительного напряжения арматуры

6.1 Расчет элементов конструкций по предельным состояниям первой группы

Расчет по прочности элементов конструкций на действие изгибающих моментов и продольных сил

Общие положения

6.1.1 Расчет по прочности элементов фибробетонных конструкций при действии изгибающих моментов и продольных сил (внецентренное сжатие или растяжение) следует производить для сечений, нормальных к их продольной оси.

Расчет по прочности нормальных сечений элементов следует производить на основе нелинейной деформационной модели согласно 6.1.14 – 6.1.21.

Расчет по прочности нормальных сечений элементов прямоугольного, таврового и двутаврового сечений без арматуры или с арматурой, расположенной у верхней и нижней граней сечения, допускается производить по предельным усилиям.

6.1.2 При расчете по прочности нормальных сечений внецентренно сжатых элементов следует учитывать случайный эксцентриситет приложения продольной силы и влияние продольного изгиба по СП 63.13330.

6.1.3 Для фибробетонных элементов, у которых предельное усилие по прочности оказывается меньше предельного усилия по образованию трещин, площадь сечения продольной растянутой арматуры должна быть увеличена по сравнению с требуемой из

расчета по прочности не менее чем на 15 %, или определена из расчета по прочности на действие предельного усилия по образованию трещин.

Расчет по прочности нормальных сечений по предельным усилиям

6.1.4 Расчет по прочности нормальных сечений элементов по предельным усилиям следует производить, определяя предельные усилия, которые могут быть восприняты бетоном и арматурой в нормальном сечении, исходя из следующих положений:

- сопротивление фибробетона растяжению представляется напряжениями, равными $k \cdot R_{fbt}$ и равномерно распределенными по растянутой зоне фибробетона;

- сопротивление фибробетона сжатию представляется напряжениями, равными R_{fb} и равномерно распределенными по сжатой зоне фибробетона;

- деформации (напряжения) в арматуре определяют в зависимости от высоты сжатой зоны фибробетона;

- растягивающие напряжения в стержневой арматуре принимают не более расчетного сопротивления растяжению R_s;

- сжимающие напряжения в стержневой арматуре принимают не более расчетного сопротивления сжатию R_{sc}.

6.1.5 Расчет по прочности нормальных сечений фибробетонных элементов с арматурой следует производить в зависимости от соотношения между значением относительной высоты сжатой зоны бетона $\xi = \frac{x}{h_0}$, определяемым из соответствующих условий равновесия, и значением граничной относительной высоты сжатой зоны ξ_R, при котором предельное состояние элемента наступает одновременно с достижением в растянутой арматуре напряжения, равного расчетному сопротивлению R_s.

6.1.6 Значение ξ_R следует определять по формуле:

$$\xi_R = \frac{x_R}{h_o} = \frac{\omega}{1 + \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_{fb2}}}, \quad (6.1)$$

где ω – характеристика сжатой зоны фибробетона, принимаемая для фибробетона из тяжелого бетона классов до В60 включительно равной 0,8, а для фибробетона из тяжелого бетона классов В70 – В100 и из мелкозернистого бетона – равной 0,7;

ε_s – расчетное значение предельных относительных деформаций арматуры, вычисляемое по формуле по СП 63.133300;

ε_{fb2} – относительные деформации сжатого бетона при напряжениях R_{bf}, принимаемые по указаниям СП 63.13330 как для обычного бетона.

Расчет изгибаемых элементов

6.1.7 Расчет по прочности сечений изгибаемых элементов следует производить из условия:

$$M \le M_{ult}, \quad (6.2)$$

где M – изгибающий момент от внешней нагрузки:

M_{ult} – предельный изгибающий момент, который может быть воспринят сечением элемента.

6.1.8 Значение M_{ult} для изгибаемых фибробетонных элементов прямоугольного сечения определяют по формулам:

- для фибробетонных элементов без арматуры (см. рисунок 2)

$$M_{ult} = 0{,}5 R_{fb} \cdot b \cdot x \cdot h, \quad (6.3)$$

при этом высоту сжатой зоны фибробетона x определяют по формуле:

$$x = \frac{\omega_t \cdot k \cdot R_{fbt} \cdot h}{\omega_t \cdot k \cdot R_{fbt} + R_{fb}}; \quad (6.4)$$

- для фибробетонных элементов с арматурой (см. рисунок 3) при $\xi = \frac{x}{h_o} \le \xi_R$

$$M_{ult} = R_{fb} \cdot b \cdot x \cdot (h_o - 0{,}5x) - \omega_t \cdot k \cdot R_{fbt} \cdot b \cdot (h - x) \cdot (\frac{h - x}{2} - a) + R_{sc} \cdot A_s^{/} (h_0 - a^{/}), \quad (6.5)$$

при этом высоту сжатой зоны определяют по формуле:

$$x = \frac{R_s \cdot A_s - R_{sc} \cdot A_s^{/} + \omega_t \cdot k \cdot R_{fbt} \cdot b \cdot h}{(R_{fb} + \omega_t \cdot k \cdot R_{fbt}) \cdot b}. \quad (6.6)$$

В формулах (6.4) – (6.6):

k = 0,56;

ω_t – коэффициент полноты эпюры напряжений в растянутой зоне фибробетона, принимаемый равным:

$$0{,}75 \text{ – при } 0{,}5 \le \frac{R_{fbt3}}{R_{fbt}} < 0{,}7;$$

$$0{,}85 \text{ – при } 0{,}7 \le \frac{R_{fbt3}}{R_{fbt}} < 0{,}9;$$

$$0{,}95 \text{ – при } 0{,}9 \le \frac{R_{fbt3}}{R_{fbt}} < 1{,}1;$$

$$1{,}05 \text{ – при } 1{,}1 \le \frac{R_{fbt3}}{R_{fbt}} < 1{,}3;$$

$$1{,}15 \text{ – при } 1{,}3 \le \frac{R_{fbt3}}{R_{fbt}};$$

здесь $\frac{R_{fbt3}}{R_{fbt}}$ – см. таблицу 2.

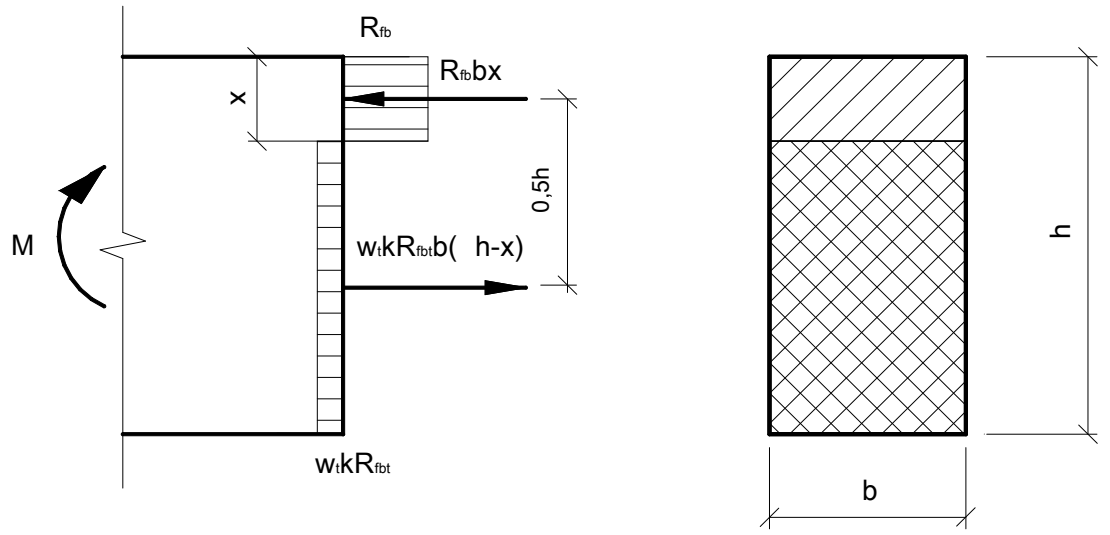


***Рисунок 2* – Схема усилий и эпюра напряжений в сечении, нормальном к продольной оси изгибаемого фибробетонного элемента прямоугольного сечения без арматуры при его расчете по прочности**

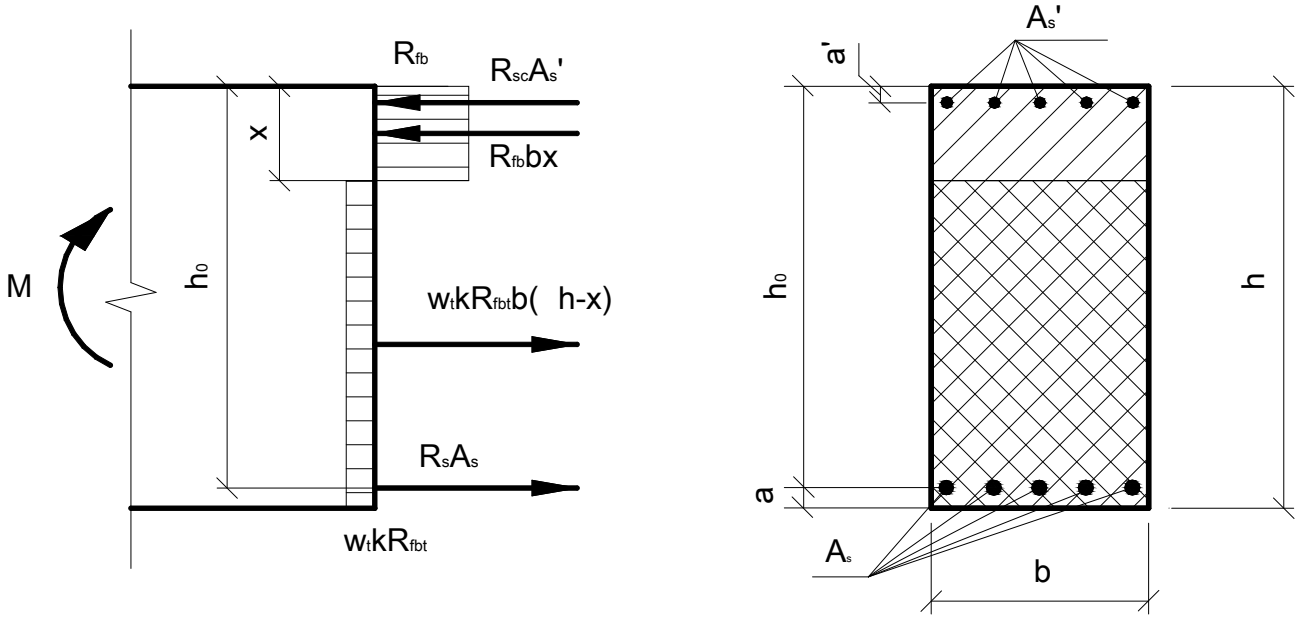


***Рисунок 3* – Схема усилий и эпюра напряжений в сечении, нормальном к продольной оси изгибаемого фибробетонного элемента прямоугольного сечения с арматурой, при его расчете по прочности**

6.1.9 Значение M_{ult} для изгибаемых фибробетонных элементов, имеющих полку в сжатой зоне (тавровые и двутавровые сечения), определяют по формулам:

- для фибробетонных элементов без арматуры (см. рисунок 4):

а) если граница проходит в полке (см. рисунок 4, а), т. е. соблюдается условие:

$$\omega_t \cdot k \cdot R_{fbt} \cdot (b_f \cdot h_f + b_w \cdot h_w) \le R_{fb} \cdot b_f^{/} \cdot h_f^{/}, \quad (6.7)$$

значение M_{ult} определяют по формуле:

$$M_{ult} = 0{,}5 \cdot \omega_t \cdot k \cdot R_{fbt} \cdot [b_f^{/} \cdot (h_f^{/} - x) \cdot (h_f^{/} + x) + b_f \cdot h_f \cdot (h_f - x + 2 \cdot (h_w + h_f^{/})) + b_w \cdot h_w \cdot (h_w - x + 2 \cdot h_f^{/})], \quad (6.8)$$

при этом высоту сжатой зоны определяют по формуле:

$$x = \frac{\omega_t \cdot k \cdot R_{fbt} \cdot (b_f^{/} \cdot h_f^{/} + b_w \cdot h_w + b_f \cdot h_f)}{b_f^{/} \cdot (\omega_t \cdot k \cdot R_{fbt} + R_{fb})}; \quad (6.9)$$

б) если граница проходит в ребре (см. рисунок 4, б), т. е. условие (6.7) не соблюдается, значение M_{ult} определяют по формуле:

$$M_{ult} = R_{fb} \cdot b_w \cdot (x - h_f^{/}) \cdot (x - 05 \cdot h_f^{/}) + \omega_t \cdot k \cdot R_{fbt} \cdot [b_w \cdot (h_w + h_f^{/} - x) + b_w \cdot h_f \cdot (h - 0{,}5 \cdot (h_f^{/} + h_f))], \quad (6.10)$$

при этом высоту сжатой зоны определяют по формуле:

$$x = \frac{\omega_t \cdot k \cdot R_{fbt} \cdot (b_w \cdot h_f^{/} + b_w \cdot h_w + b_w \cdot h_f^{/}) + R_{fb} \cdot h_f^{/} \cdot (b_f^{/} - b_w)}{b_w \cdot (\omega_t \cdot k \cdot R_{fbt} + R_{fb})}; \quad (6.11)$$

- для фибробетонных элементов с арматурой при $\xi = \frac{x}{h_o} \le \xi_R$ (см. рисунок 5):

а) если граница проходит в полке (см. рисунок 5, а), т. е. соблюдается условие:

$$R_s \cdot A_s + \omega_t \cdot k \cdot R_{fbt} \cdot (b_f \cdot h_f + b_w \cdot h_w) \le R_{sc} \cdot A_s^{/} + R_{fb} \cdot b_f^{/} \cdot h_f^{/}, \quad (6.12)$$

значение M_{ult} определяют по формуле:

$$M_{ult} = R_{fb} \cdot b_f^{/} \cdot x \cdot (h_0 - 0{,}5x) - \omega_t \cdot k \cdot R_{fbt} \cdot [b_f \cdot h_f \cdot (0{,}5h_f - a) + b_w \cdot h_w \cdot (0{,}5h_w + h_f - a) + + b_f^{/} \cdot (h_f^{/} - x) \cdot (h_0 - 0{,}5 \cdot (h_f^{/} + x))] + R_{sc} \cdot A_s^{/} \cdot (h_0 - a^{/}), \quad (6.13)$$

при этом высоту сжатой зоны определяют по формуле:

$$x = \frac{R_s \cdot A_s + \omega_t \cdot k \cdot R_{fbt} \cdot (b_f^{/} \cdot h_f^{/} + b_w \cdot h_w + b_f \cdot h_f) - R_{sc} \cdot A_s^{/}}{b_w \cdot (\omega_t \cdot k \cdot R_{fbt} + R_{fb})}; \quad (6.14)$$

б) если граница проходит в ребре (см. рисунок 5, б), т. е. условие (6.12) не соблюдается, значение M_{ult} определяют по формуле:

$$M_{ult} = R_{fb} \cdot [b_f^{/} \cdot h_f^{/} \cdot (h_0 - 0{,}5 \cdot h_f^{/}) + b_w \cdot (x - h_f^{/}) \cdot (h_0 - h_f - 0{,}5 \cdot x + 0{,}5 \cdot h_f^{/})] - - \omega_t \cdot k \cdot R_{fbt} \cdot [b_f \cdot h_f \cdot (0{,}5h_f - a) + b_w \cdot (h_0 + h_f^{/} - x) \cdot (h_0 - 0{,}5 \cdot (x + h_w + h_f^{/}) + + b_f \cdot h_f \cdot (0{,}5 \cdot h_f - a)] + R_{sc} \cdot A_s^{/} \cdot (h_0 - a^{/}), \quad (6.15)$$

при этом высоту сжатой зоны бетона x определяют по формуле:

$$x = \frac{R_s \cdot A_s + \omega_t \cdot k \cdot R_{fbt} \cdot (b_w \cdot h_f^{/} + b_w \cdot h_w + b_f \cdot h_f) - R_{fb} \cdot h_f^{/} \cdot (b_f^{/} - b_w) - R_{sc} \cdot A_s^{/}}{b_w \cdot (\omega_t \cdot k \cdot R_{fbt} + R_{fb})}. \quad (6.16)$$

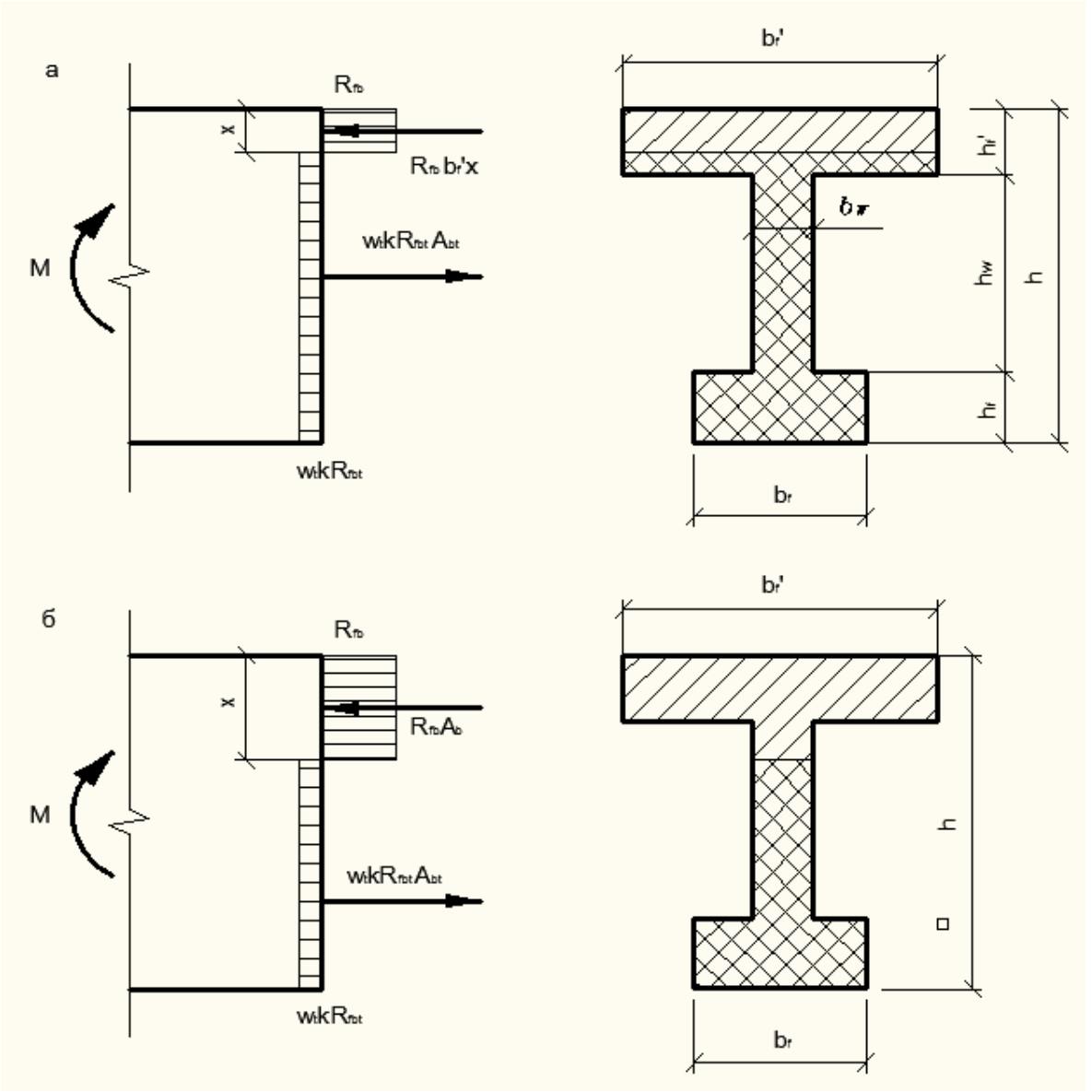


***Рисунок 4* – Положение границы сжатой зоны в сечении изгибаемого фибробетонного элемента без арматуры**

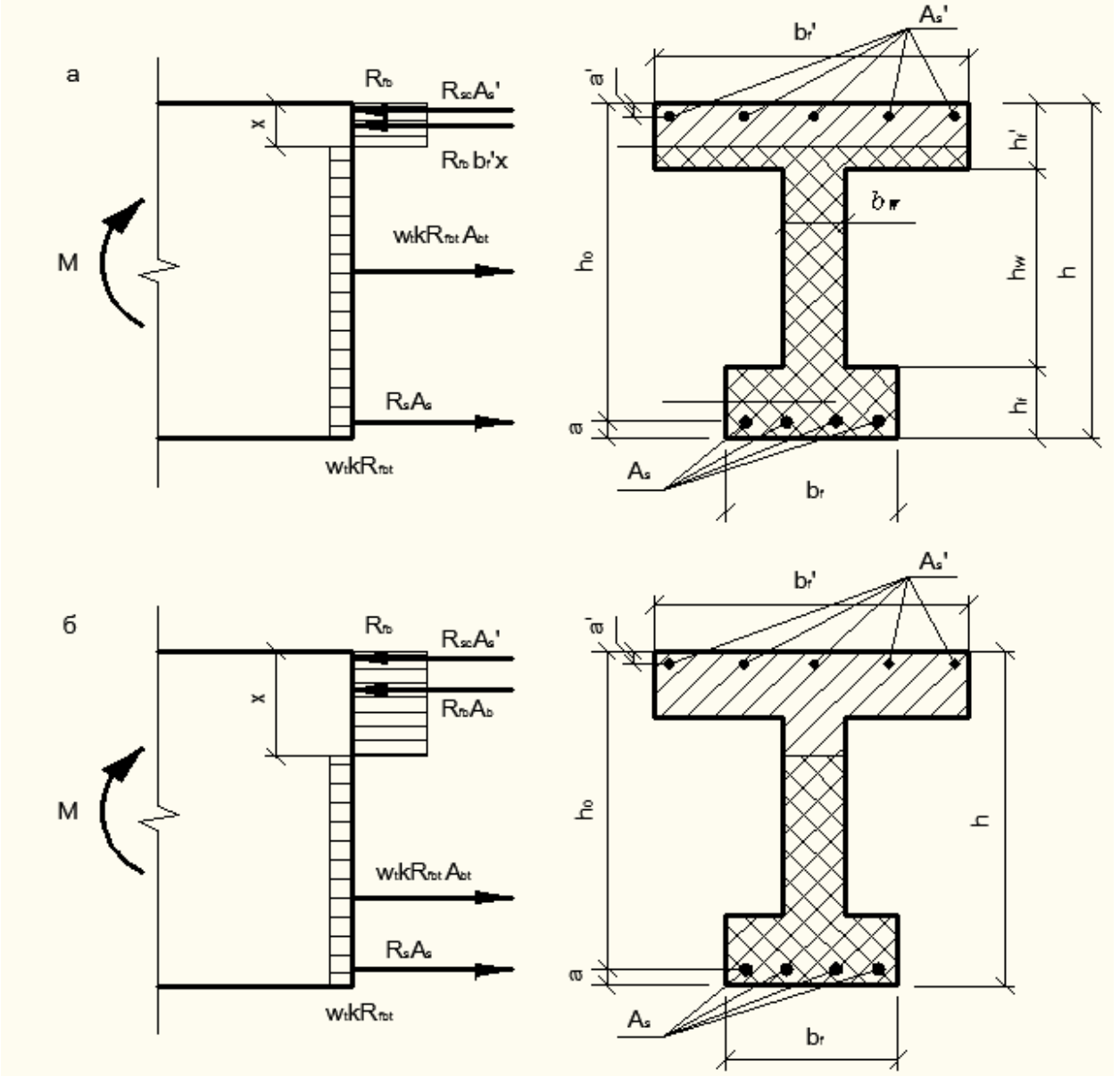


***Рисунок 5* – Положение границы сжатой зоны в сечении изгибаемого фибробетонного элемента с арматурой**

Значение $b_f^{'}$, вводимое в расчет, принимают по СП 63.13330.

6.1.10 При расчете по прочности изгибаемых элементов рекомендуется соблюдать условие $x \le \xi_R \cdot h_o$.

В случае, когда по конструктивным соображениям или из расчета по предельным состояниям второй группы площадь растянутой арматуры принята большей, чем это требуется для соблюдения условия $x \le \xi_R \cdot h_o$, допускается предельный изгибающий момент M_{ult} определять по формулам (6.5) или (6.15), подставляя в них значения высоты сжатой зоны $x = \xi_R \cdot h_o$.

Расчет внецентренно сжатых элементов

6.1.11 Расчет внецентренно сжатых фибробетонных элементов без рабочей арматуры при расположении продольной сжимающей силы в пределах поперечного сечения

элемента производят без учета сопротивления фибробетона растянутой зоны (см. рисунок 6.5) из условия:

$$N \le R_{fb} \cdot A_b \cdot , \quad (6.17)$$

где N – действующая продольная сила;

A_b – площадь сжатой зоны бетона, определяемая из условия, что ее центр тяжести совпадает с точкой приложения продольной силы N (с учетом прогиба).

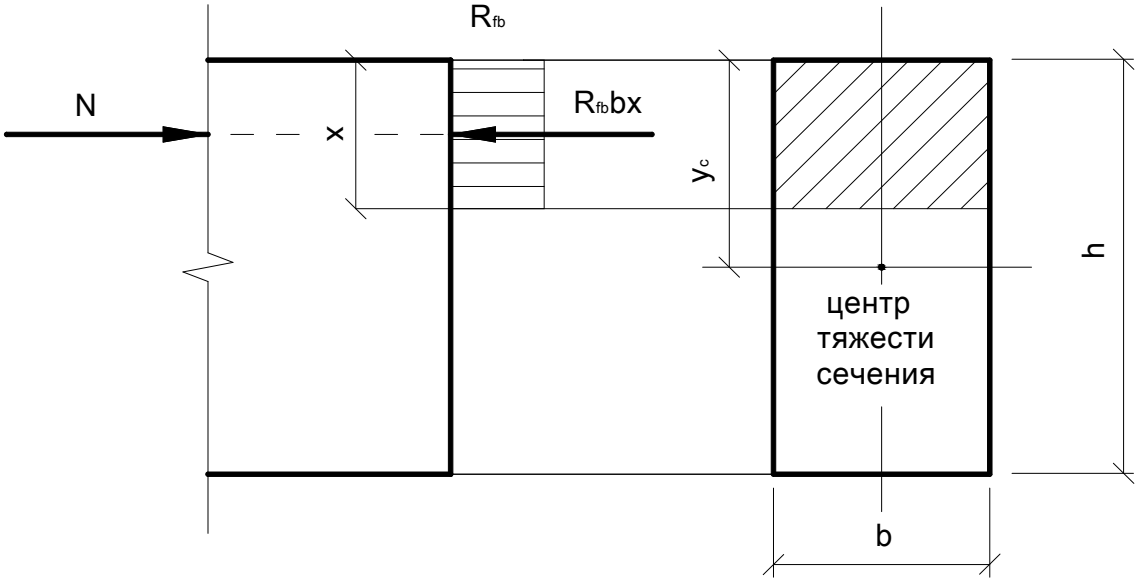


***Рисунок 6.5* – Схема усилий и эпюра напряжений в сечении, нормальном к продольной оси внецентренно сжатого фибробетонного элемента, рассчитываемого по прочности без учета сопротивления бетона растянутой зоны**

Для элементов прямоугольного сечения:

$$A_b = b \cdot h \cdot (1 - \frac{2 \cdot e_0 \cdot \eta}{h}) , \quad (6.18)$$

где e_0 – случайный эксцентриситет, принимаемый по СП 63.13330;

η – коэффициент, учитывающий влияние продольного изгиба (прогиба) элемента на его несущую способность и определяемый по формуле:

$$\eta = \frac{1}{1 - \frac{N}{N_{cr}}} , \quad (6.19)$$

где N_{cr} – условная критическая сила, определяемая по формуле:

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot D}{l_0^2} , \quad (6.20)$$

здесь D – жесткость элемента в предельной по прочности стадии, определяемая по формуле:

$$D = k_b \cdot E_{fb} \cdot I , \quad (6.21)$$

где E_{fb}, – модуль упругости фибробетона;

I – момент инерции площади поперечного сечения элемента относительно оси, проходящей через его центр тяжести;

$$k_b = \frac{0.15}{\varphi_l (0.3 + \delta_e)} , \quad (6.22)$$

здесь φ_l – коэффициент, учитывающий влияние длительности действия нагрузки:

$$\varphi_l = 1 + \frac{M_{l1}}{M_1} \le 2 \quad , \tag{6.23}$$

где M_1, M_{l1} – моменты относительно наиболее растянутой или наименее сжатой (при целиком сжатом сечении) грани сечения соответственно от действия полной нагрузки и от действия постоянных и длительных нагрузок;

δ_e – относительное значение эксцентриситета продольной силы $\frac{e_0}{h}$, принимаемое не менее 0,15 и не более 1,5.

Допускается расчет внецентренно сжатых фибробетонных элементов прямоугольного сечения при эксцентриситете продольной силы $e_0 \le h/30$ и $l_0 \le 20h$ производить из условия:

$$N \le \varphi \cdot R_{fb} \cdot A, \tag{6.24}$$

где A – площадь поперечного сечения элемента;

φ – коэффициент, принимаемый при длительном действии нагрузки по таблице 3 в зависимости от гибкости $\frac{l_0}{h}$ элемента, при кратковременном действии нагрузки значения φ определяют по линейному закону, принимая:

φ = 0,9 при $\frac{l_0}{h}$ =10;

φ = 0,85 при $\frac{l_0}{h}$ =20,

где l_0 – расчетная длина элемента, определяемая по СП 63.13330 как для железобетонных элементов.

Т а б л и ц а 3

l_0/h	6	10	15	20
φ	0,92	0,90	0,80	0,60

6.1.12 Расчет внецентренно сжатых фибробетонных элементов без рабочей арматуры при расположении продольной сжимающей силы за пределами поперечного сечения элемента, а также внецентренно сжатых фибробетонных элементов без рабочей арматуры при расположении продольной сжимающей силы в пределах поперечного сечения элемента, в которых по условиям эксплуатации не допускается образование трещин, производят с учетом сопротивления фибробетона растянутой зоны (см. рисунок 7) из условия:

$$N \le \frac{R_{ft} \cdot A}{\frac{A}{I} \cdot e_0 \cdot \eta \cdot y_t - 1}. \tag{6.25}$$

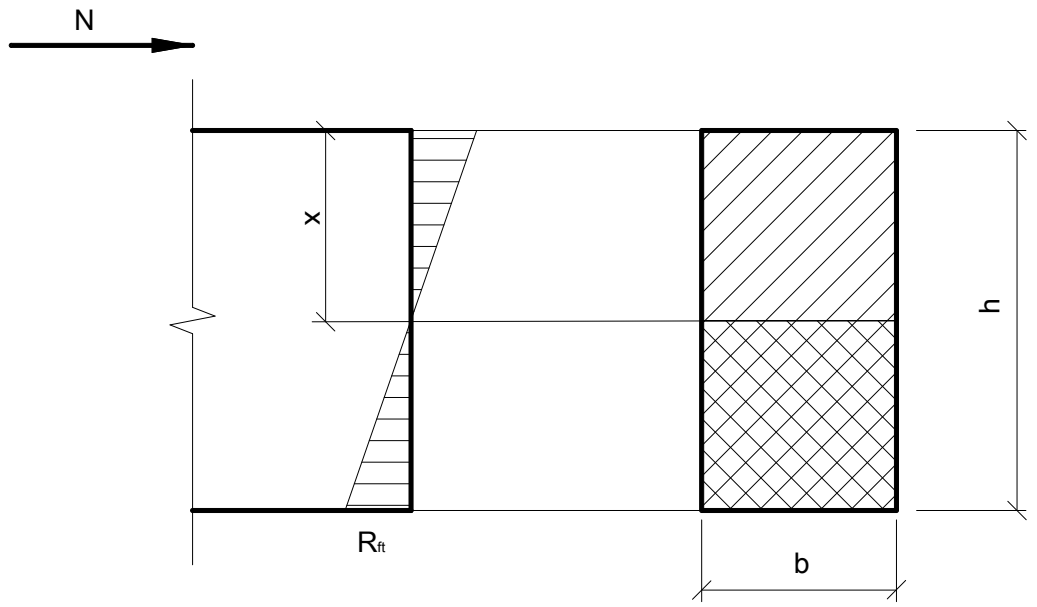


***Рисунок 7* – Схема усилий и эпюра напряжений в сечении, нормальном к продольной оси внецентренно сжатого фибробетонного элемента, рассчитываемого по прочности с учетом сопротивления бетона растянутой зоны**

Для элементов прямоугольного сечения условие (6.20) имеет вид:

$$N \le \frac{R_{ft} \cdot b \cdot h}{\frac{6 \cdot e_0 \cdot \eta}{h} - 1}. \qquad (6.36)$$

В формулах (6.24) – (6.36):

- R_{ft} – расчетное сопротивление фибробетона осевому растяжению;
- А – площадь поперечного сечения фибробетонного элемента;
- I – момент инерции сечения фибробетонного элемента относительно его центра тяжести;
- y_t – расстояние от центра тяжести сечения фибробетонного элемента до наиболее растянутого волокна;

η – коэффициент, определяемый по 6.1.11, при этом в формуле (6.20) значение жесткости элемента в предельной по прочности стадии определяют по формуле:

$$D = k_b \cdot E_{fb} \cdot I_f + 0{,}7 \cdot E_s \cdot I_s, \qquad (6.27)$$

где I, I_s – моменты инерции площадей сечения фибробетона и всей продольной арматуры соответственно относительно оси, проходящей через центр тяжести поперечного сечения элемента.

6.1.13 Расчет внецентренно сжатых фибробетонных элементов прямоугольного сечения с рабочей арматурой производят из условия (см. рисунок 8):

$$N \cdot e \le R_{fb} \cdot b \cdot x \cdot (h_0 - 0{,}5x) - \omega_t \cdot k \cdot R_{fbt} \cdot b \cdot (h - x)(\frac{h - x}{2} - a) + R_{sc} \cdot A_s^{/}(h_0 - a^{/}), \qquad (6.28)$$

где N – продольная сила от внешней нагрузки;

e – расстояние от точки приложения продольной силы N до центра тяжести сечения растянутой арматуры:

$$e = e_o \cdot \eta + \frac{h_o - a^{'}}{2}, \qquad (6.29)$$

здесь e_0 – случайный эксцентриситет, принимаемый по СП 63.13330;

η – коэффициент, определяемый по 6.1.11.

Высоту сжатой зоны *x* определяют:

а) при $\xi = \frac{x}{h_o} \le \xi_R$ (см. рисунок 8) – по формуле:

$$x = \frac{N + R_s \cdot A_s - R_{sc} \cdot A_s^{/} + k \cdot R_{fbt} \cdot b \cdot h}{(R_{fb} + k \cdot R_{fbt}) \cdot b}; \qquad (6.30)$$

б) при $\xi = \frac{x}{h_o} > \xi_R$ – по формуле:

$$x = \frac{N + R_s \cdot A_s \cdot \frac{1+\xi_R}{1-\xi_R} - R_{sc} \cdot A_s^{/} + k \cdot R_{fbt} \cdot b \cdot h}{(R_{fb} + k \cdot R_{fbt}) \cdot b + \frac{2R_s \cdot A_s}{h_o(1-\xi_R)}}. \qquad (6.31)$$

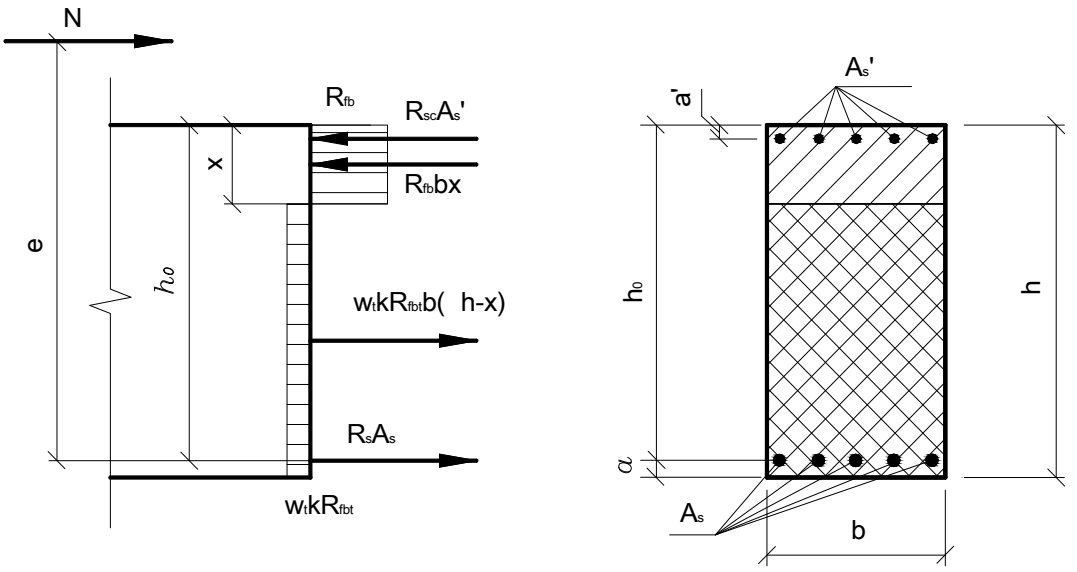


***Рисунок 8* – Схема усилий и эпюра напряжений в сечении, нормальном к продольной оси внецентренно сжатого фибробетонного элемента с рабочей арматурой, при расчете ее по прочности**

Допускается расчет по прочности прямоугольных сечений внецентренно сжатых фибробетонных элементов с арматурой, расположенной у противоположных в плоскости изгиба сторон сечения, при эксцентриситете продольной силы $e_0 \le \frac{h}{30}$ и гибкости $\frac{l_0}{h} \le 20$ производить из условия:

$$N \le N_{ult}, \qquad (6.32)$$

где N_{ult} – предельное значение продольной силы, которую может воспринять элемент, определяемое по формуле:

$$N_{ult} \le \varphi \cdot (R_{fb} \cdot A + R_{sc} \cdot A_{s,tot}), \qquad (6.33)$$

здесь A – площадь фибробетонного сечения;

$A_{s,tot}$ – площадь всей продольной арматуры в сечении элемента;

φ – коэффициент, принимаемый при длительном действии нагрузки по таблице 4 в зависимости от гибкости элемента; при кратковременном действии нагрузки значения φ определяют по линейному закону, принимая:

φ= 0,9 при $\frac{l_0}{h} = 10$,

φ= 0,85 при $\frac{l_0}{h} = 20$.

Т а б л и ц а 4

Класс бетона	φ при l_0/h, равном			
	6	10	15	20
В20 – В55	0,92	0,90	0,83	0,70
В60	0,91	0,89	0,80	0,65
В80	0,90	0,88	0,79	0,64

Расчет по прочности нормальных сечений на основе нелинейной деформационной модели

6.1.14 При расчете по прочности усилия и деформации в сечении, нормальном к продольной оси элемента, определяют на основе нелинейной деформационной модели, использующей уравнения равновесия внешних сил и внутренних усилий в сечении элемента, а также следующих положений:

- распределение относительных деформаций фибробетона и арматуры по высоте сечения элемента принимают по линейному закону (гипотеза плоских сечений);
- связь между осевыми напряжениями и относительными деформациями фибробетона и арматуры принимают в виде диаграмм состояния (деформирования) фибробетона и арматуры.

Переход от эпюры напряжений в фибробетоне к обобщенным внутренним усилиям определяют с помощью процедуры численного интегрирования напряжений по нормальному сечению. Для этого нормальное сечение условно разделяют на малые участки: при косом внецентренном сжатии (растяжении) и косом изгибе – по высоте и ширине сечения; при внецентренном сжатии (растяжении) и изгибе в плоскости оси симметрии поперечного сечения элемента – только по высоте сечения. Напряжения в пределах малых участков принимают равномерно распределенными (усредненными).

6.1.15 При расчете элементов с использованием деформационной модели принимают:

- значения сжимающей продольной силы, а также сжимающих напряжений и деформаций укорочения фибробетона и арматуры со знаком «минус»;
- значения растягивающей продольной силы, а также растягивающих напряжений и деформаций удлинения фибробетона и арматуры со знаком «плюс».

Знаки координат центров тяжести арматурных стержней и выделенных участков фибробетона, а также точки приложения продольной силы принимают в соответствии с назначенной системой координат XOY. В общем случае начало координат этой системы располагают в произвольном месте в пределах поперечного сечения элемента (см. рисунок 9).

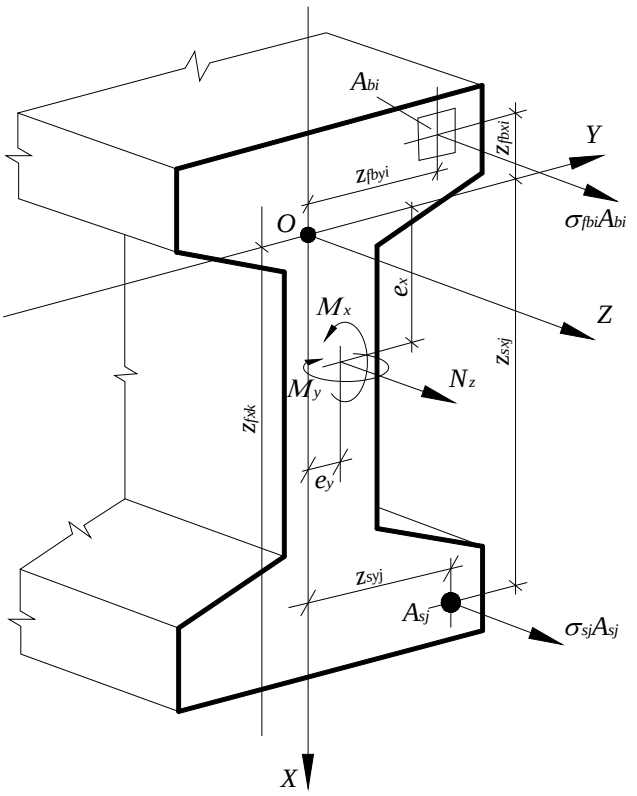


***Рисунок 9* – Расчетная схема нормального сечения элемента**

6.1.16 При расчете нормальных сечений по прочности в общем случае (см. рисунок 9) используют:

- уравнения равновесия внешних сил и внутренних усилий в нормальном сечении элемента:

$$M_x = \sum_i \sigma_{fbi} \cdot A_{bi} \cdot Z_{fbxi} + \sum_j \sigma_{sj} \cdot A_{sj} \cdot Z_{sxj}\,, \tag{6.34}$$

$$M_y = \sum_i \sigma_{fbi} \cdot A_{bi} \cdot Z_{fbyi} + \sum_j \sigma_{sj} \cdot A_{sj} \cdot Z_{syj}\,, \tag{6.35}$$

$$N = \sum_i \sigma_{fbi} \cdot A_{bi} + \sum_j \sigma_{sj} \cdot A_{sj}\,; \tag{6.36}$$

- уравнения, определяющие распределение деформаций по сечению элемента:

$$\varepsilon_{fbi} = \varepsilon_o + \frac{1}{r_x} \cdot Z_{fbxi} + \frac{1}{r_y} \cdot Z_{fbyi}\,, \tag{6.37}$$

$$\varepsilon_{sj} = \varepsilon_o + \frac{1}{r_x} \cdot Z_{sxj} + \frac{1}{r_y} \cdot Z_{sj}\,; \tag{6.38}$$

- зависимости, связывающие напряжения и относительные деформации фибробетона и арматуры:

$$\sigma_{fbi} = E_{fb} \cdot \nu_{fbi} \cdot \varepsilon_{fbi}\,, \tag{6.39}$$

$$\sigma_{sj} = E_{sj} \cdot \varepsilon_{sj}\,. \tag{6.40}$$

В уравнениях (6.34) – (6.40):

M_x, M_y – изгибающие моменты от внешней нагрузки относительно выбранных и располагаемых в пределах поперечного сечения элемента координатных осей (соответственно действующих в плоскостях XOZ и УOZ или параллельно им), определяемые по формулам:

$$M_x = M_{xd} + N \cdot e_x, \quad (6.41)$$

$$M_y = M_{yd} + N \cdot e_y, \quad (6.42)$$

где M_{xd}, M_{yd} – изгибающие моменты в соответствующих плоскостях от внешней нагрузки, определяемые из статического расчета конструкции;

N – продольная сила от внешней нагрузки;

e_x, e_y – расстояния от точки приложения продольной силы N до соответствующих выбранных осей;

A_{bi}, Z_{fbxi}, Z_{fbyi}, σ_{fbi} – площадь, координаты центра тяжести i-го участка фибробетона и напряжение на уровне его центра тяжести;

A_{sj}, Z_{sxj}, Z_{syj}, σ_{sj} – площадь, координаты центра тяжести j-го стержня арматуры и напряжение в нем;

ε_o – относительная деформация волокна, расположенного на пересечении выбранных осей (в точке 0);

$\frac{1}{r_x}$, $\frac{1}{r_y}$ – кривизна продольной оси в рассматриваемом поперечном сечении элемента в плоскостях действия изгибающих моментов M_x и M_y;

E_{fb} – начальный модуль упругости фибробетона;

E_{sj} – модуль упругости j-го стержня арматуры;

ν_{sj} – коэффициент упругости j-го стержня арматуры;

ν_{fbi} – коэффициент упругости фибробетона i-го участка.

Коэффициенты ν_{sj} принимают по соответствующим диаграммам состояния бетона и арматуры, указанным в СП 63.13330.

Значения коэффициентов ν_{bi} определяют как соотношение значений напряжений и деформаций для рассматриваемых точек диаграмм состояния фибробетона, принятых в расчете, деленное на модуль упругости сжатого фибробетона E_{fb} (при двухлинейной диаграмме состояния сжатого фибробетона – на приведенный модуль деформации сжатого фибробетона $E_{fb,red}$) или на приведенный модуль деформации растянутого фибробетона:

$$\nu_{fbi} = \frac{\sigma_{fbi}}{E_{fb} \cdot \varepsilon_{fbi}}. \quad (6.43)$$

6.1.17 Расчет нормальных сечений элементов по прочности производят из условий:

$$\left|\varepsilon_{fb,\max}\right| \le \varepsilon_{fb,ult}, \quad (6.44)$$

$$\left|\varepsilon_{fbt,\max}\right| \le \varepsilon_{fbt,ult}, \quad (6.45)$$

$$\varepsilon_{s,\max} \le \varepsilon_{s,ult}, \quad (6.46)$$

где $\varepsilon_{fb,max}$ – относительная деформация наиболее сжатого волокна фибробетона в нормальном сечении элемента от действия внешней нагрузки;

$\varepsilon_{fbt,max}$ – относительная деформация наиболее растянутого волокна фибробетона в нормальном сечении элемента от действия внешней нагрузки;

$\varepsilon_{s,max}$ – относительная деформация наиболее растянутого стержня арматуры в нормальном сечении элемента от действия внешней нагрузки;

$\varepsilon_{fb,ult}$ – предельное значение относительной деформации фибробетона при сжатии, принимаемое согласно указаниям 6.1.21;

$\varepsilon_{fbt,ult}$ – предельное значение относительной деформации фибробетона при растяжении, принимаемое равным ε_{fbt3} (0,01 или 0,02 – см. 5.2.9);

$\varepsilon_{s,ult}$ – предельное значение относительной деформации удлинения арматуры, принимаемое согласно указаниям 6.1.21.

6.1.18 Для элементов, на которые действуют изгибающие моменты двух направлений и продольная сила (см. рисунок 9), деформации фибробетона $\varepsilon_{fb,max}$ и арматуры $\varepsilon_{s,max}$ в нормальном сечении произвольной формы определяют из решения системы уравнений (6.47) – (6.49) с использованием уравнений (6.37) и (6.38):

$$M_x = D_{11} \cdot \frac{1}{r_x} + D_{12} \cdot \frac{1}{r_y} + D_{13} \cdot \varepsilon_o , \quad (6.47)$$

$$M_y = D_{12} \cdot \frac{1}{r_x} + D_{22} \cdot \frac{1}{r_y} + D_{23} \cdot \varepsilon_o , \quad (6.48)$$

$$N = D_{13} \cdot \frac{1}{r_x} + D_{23} \cdot \frac{1}{r_y} + D_{33} \cdot \varepsilon_o . \quad (6.49)$$

Жесткостные характеристики D_{ij} (i,j = 1,2,3) в системе уравнений (6.47) – (6.49) определяют по формулам:

$$D_{11} = \sum_i A_{bi} \cdot Z_{fbxi}^2 \cdot E_{fb} \cdot \nu_{fbi} + \sum_j A_{sj} \cdot Z_{sxj}^2 \cdot E_{sj} , \quad (6.50)$$

$$D_{22} = \sum_i A_{bi} \cdot Z_{fbyi}^2 \cdot E_{fb} \cdot \nu_{fbi} + \sum_j A_{sj} \cdot Z_{syj}^2 \cdot E_{sj} , \quad (6.51)$$

$$D_{12} = \sum_i A_{bi} \cdot Z_{fbxi} \cdot Z_{fbyi} \cdot E_{fb} \cdot \nu_{fbi} + \sum_j A_{sj} \cdot Z_{sxj} \cdot Z_{syj} \cdot E_{sj} , \quad (6.52)$$

$$D_{13} = \sum_i A_{bi} \cdot Z_{fbxi} \cdot E_{fb} \cdot \nu_{fbi} + \sum_j A_{sj} \cdot Z_{sxj} \cdot E_{sj} , \quad (6.53)$$

$$D_{23} = \sum_i A_{bi} \cdot Z_{fbyi} \cdot E_{fb} \cdot \nu_{fbi} + \sum_j A_{sj} \cdot Z_{syj} \cdot E_{sj} , \quad (6.54)$$

$$D_{33} = \sum_i A_{bi} . E_{fb} \cdot \nu_{fbi} + \sum_j A_{sj} \cdot E_{sj} . \quad (6.55)$$

Обозначения в формулах – см. 6.1.16.

6.1.19 Для элементов, на которые действуют только изгибающие моменты двух направлений M_x и M_y (косой изгиб), в уравнении (6.49) принимают $N=0$.

Для внецентренно сжатых в плоскости симметрии поперечного сечения элементов и расположении оси X в этой плоскости в уравнениях (6.47) – (6.49) принимают M_y=0 и $D_{12}=D_{22}=D_{23}$=0. В этом случае уравнения равновесия имеют вид:

$$M_x = D_{11} \cdot \frac{1}{r_x} + D_{13} \cdot \varepsilon_o , \quad (6.56)$$

$$N = D_{13} \cdot \frac{1}{r_x} + D_{33} \cdot \varepsilon_o . \quad (6.57)$$

Для изгибаемых в плоскости симметрии поперечного сечения элементов и расположения оси X в этой плоскости в уравнениях (6.47) – (6.49) принимают $N=0$, $M_y=0$, $D_{12}=D_{22}=D_{23}$=0. В этом случае уравнения равновесия имеют вид:

$$M_x = D_{11} \cdot \frac{1}{r_x} + D_{13} \cdot \varepsilon_o , \quad (6.58)$$

$$0 = D_{13} \cdot \frac{1}{r_x} + D_{33} \cdot \varepsilon_o . \quad (6.59)$$

6.1.20 Расчет по прочности нормальных сечений внецентренно сжатых фибробетонных элементов без стержневой арматуры производят из условия (6.44) согласно указаниям 6.1.17 – 6.1.19, принимая в формулах (6.46) – (6.55) для определения D_{ij} площадь арматуры A_{sj} = 0.

Для изгибаемых и внецентренно сжатых фибробетонных элементов, в которых не допускаются трещины, расчет производят с учетом работы растянутого бетона в поперечном сечении элемента из условия:

$$\varepsilon_{fbt,\max} \le \varepsilon_{fbt,ult}, \qquad (6.60)$$

где $\varepsilon_{fbt,\max}$ – относительная деформация наиболее растянутого волокна бетона в нормальном сечении элемента от действия внешней нагрузки, определяемая согласно 6.1.18 – 6.1.19;

$\varepsilon_{fbt,ult}$ – предельное значение относительной деформации бетона при растяжении, принимаемое согласно указаниям 6.1.21.

6.1.21 Предельные значения относительных деформаций бетона $\varepsilon_{b,ult}$ принимают согласно указаниям СП 63.13330 как для обычного бетона.

Предельные значения относительных деформаций бетона $\varepsilon_{bt,ult}$ принимают при двузначной эпюре деформаций (сжатие и растяжение) в поперечном сечении бетона элемента (изгиб, внецентренное сжатие или растяжение с большими эксцентриситетами) равными ε_{fbt3}.

При внецентренном растяжении элементов и распределении в поперечном сечении бетона элемента деформаций только одного знака предельные значения относительных деформаций фибробетона $\varepsilon_{bt,ult}$ определяют в зависимости от соотношения деформаций бетона на противоположных гранях сечения элемента ε_1 и ε_2 $\left(|\varepsilon_2| \ge |\varepsilon_1|\right)$ по формулам:

$$\varepsilon_{fbt,ult} = \varepsilon_{fbt3} - (\varepsilon_{fbt3} - \varepsilon_{fbt2}) \cdot \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}, \qquad (6.61)$$

где ε_{fbt2} *и* ε_{fbt3} – деформационные параметры расчетных диаграмм состояния бетона при растяжении, принимаемые согласно 5.2.9.

При расчете изгибаемых и внецентренно сжатых фибробетонных элементов, в которых не допускаются трещины, значение $\varepsilon_{fbt,ult}$ в условии (А.6.57) принимают:

- при двузначной эпюре деформаций (сжатие и растяжение) в поперечном сечении бетона элемента – равными ε_{fbt2};
- при распределении в поперечном сечении элемента деформаций фибробетона только одного знака – значению, вычисленному по формуле (А.6.57), в которую вместо значений параметров ε_{fbt2}и ε_{fbt3} подставляют значения параметров соответственно ε_{fbt0} и ε_{fbt2}.

Предельные значения относительной деформации арматуры $\varepsilon_{s,ult}$ принимают равными:

0,025 – для арматуры с физическим пределом текучести;

0,015 – для арматуры с условным пределом текучести.

Расчет по прочности элементов при действии поперечных сил

Общие положения

6.1.22 Расчет по прочности элементов при действии поперечных сил следует производить по наклонному сечению на действие поперечной силы, по наклонному сечению на действие изгибающего момента и по полосе между наклонными сечениями на действие поперечной силы.

Расчет элементов по полосе между наклонными сечениями

6.1.23 Расчет изгибаемых элементов по бетонной полосе между наклонными сечениями производят из условия:

$$Q \le 0{,}3 \cdot R_{fb} \cdot b \cdot h_0, \qquad (6.62)$$

где Q – поперечная сила в нормальном сечении элемента.

Расчет элементов по наклонным сечениям на действие поперечных сил

6.1.24 Расчет изгибаемых элементов по наклонному сечению (см. рисунок 10) производят из условия:

$$Q \le Q_{fb} + Q_{sw}, \tag{6.63}$$

где Q – поперечная сила в наклонном сечении с длиной проекции C на продольную ось элемента, определяемая от всех внешних сил, расположенных по одну сторону от рассматриваемого наклонного сечения; при этом учитывают наиболее опасное загружение в пределах наклонного сечения;

Q_{fb} – поперечная сила, воспринимаемая фибробетоном в наклонном сечении;

Q_{sw} – поперечная сила, воспринимаемая поперечной арматурой в наклонном сечении.

Поперечную силу Q_{fb} определяют по формуле:

$$Q_{fb} = \frac{1{,}5 \cdot R_{ft} \cdot b \cdot h_0^2}{C}, \tag{6.64}$$

но принимают не более $2{,}5R_{ft} \cdot b \cdot h_0$ и не менее $0{,}5R_{ft} \cdot b \cdot h_0$.

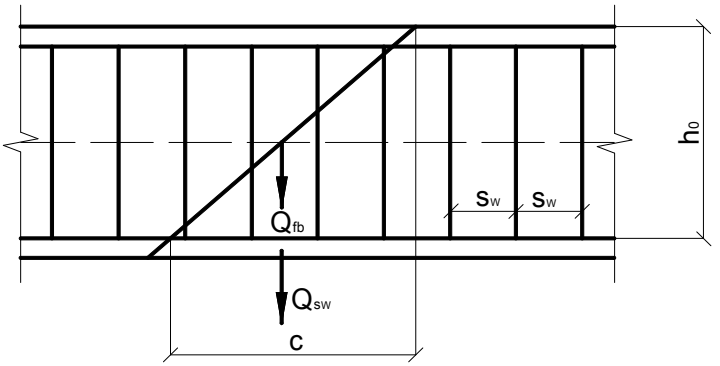


***Рисунок 10* – Схема усилий при расчете элементов по наклонному сечению на действие поперечных сил**

Усилие Q_{sw} для поперечной арматуры, нормальной к продольной оси элемента, определяют по формуле:

$$Q_{sw} = 0{,}75 \cdot q_{sw} \cdot C, \tag{6.65}$$

где q_{sw} – усилие в поперечной арматуре на единицу длины элемента, равное:

$$q_{sw} = \frac{R_{sw} \cdot A_{sw}}{s_w}. \tag{6.66}$$

Расчет производят для ряда расположенных по длине элемента наклонных сечений при наиболее опасной длине проекции наклонного сечения C. При этом длину проекции C в формуле (6.65) принимают не менее 1,0 h_0 и не более 2,0 h_0.

Поперечную арматуру учитывают в расчете, если соблюдается условие $q_{sw} \ge 0{,}25R_{fbt} \cdot b$.

Шаг учитываемой в расчете поперечной арматуры $\frac{s_w}{h_o}$ должен быть не больше значения $\frac{s_{w,\max}}{h_o} = \frac{R_{ft} \cdot b \cdot h_o}{Q}$.

При отсутствии поперечной арматуры или нарушении указанных выше требований, расчет производят из условий (6.63), принимая усилие Q_{sw} равным нулю.

6.1.25 Влияние сжимающих и растягивающих напряжений при расчете по полосе между наклонными сечениями и по наклонным сечениям следует учитывать по указаниям СП 63.13330.

Расчет элементов по наклонным сечениям на действие моментов

6.1.26 Расчет элементов по наклонным сечениям на действие моментов (см. рисунок 11) производят из условия:

$$M \le M_s + M_{sw}, \tag{6.67}$$

где M – момент в наклонном сечении с длиной проекции C на продольную ось элемента, определяемый от всех внешних сил, расположенных по одну сторону от рассматриваемого наклонного сечения, относительно конца наклонного сечения (точка 0), противоположного концу, у которого располагается проверяемая продольная арматура, испытывающая растяжение от момента в наклонном сечении; при этом учитывают наиболее опасное загружение в пределах наклонного сечения;

M_s – момент, воспринимаемый продольной арматурой, пересекающей наклонное сечение, относительно противоположного конца наклонного сечения (точка 0);

M_{sw} – момент, воспринимаемый поперечной арматурой, пересекающей наклонное сечение, относительно противоположного конца наклонного сечения (точка 0).

Момент M_s определяют по формуле:

$$M_s = N_s \cdot z_s, \tag{6.68}$$

где N_s – усилие в продольной растянутой арматуре, принимаемое равным $R_s \cdot A_s$;

z_s – плечо внутренней пары сил; допускается принимать $z_s = 0{,}9h_o$.

Момент M_{sw} для поперечной арматуры, нормальной к продольной оси элемента, определяют по формуле:

$$M_{sw} = 0{,}5 \cdot Q_{sw} \cdot C, \tag{6.69}$$

где Q_{sw} – усилие в поперечной арматуре, принимаемое равным $q_{fw} \cdot C$;

q_{sw} – определяют по формуле (6.66), а C принимают в пределах от 1,0 h_o до 2,0 h_o.

Расчет производят для наклонных сечений, расположенных по длине элемента на его концевых участках и в местах обрыва продольной арматуры, при наиболее опасной длине проекции наклонного сечения C, принимаемой в пределах от 1,0 h_o до 2,0 h_o.

Допускается производить расчет наклонных сечений, принимая в условии (6.67) момент M в наклонном сечении при длине проекции C на продольную ось элемента, равной 2,0 h_o, а момент M_{fw} – равным $0{,}5q_{fw} \cdot h_o^2$.

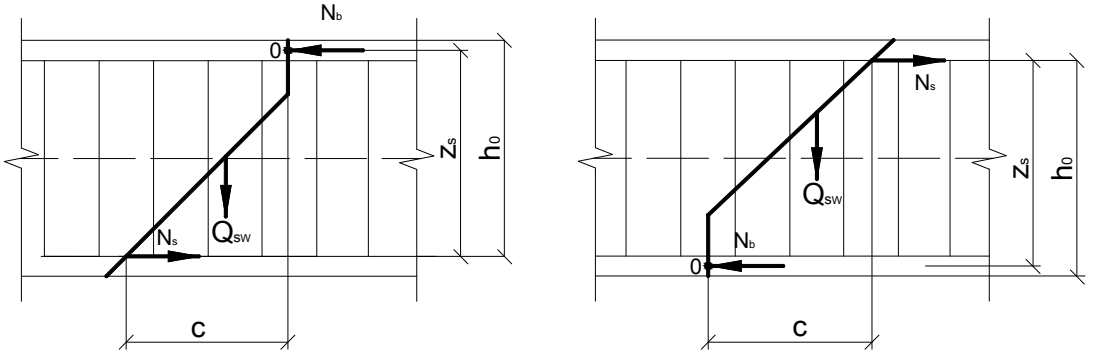


***Рисунок 11* – Схема усилий при расчете элементов по наклонному сечению на действие моментов**

Расчет фибробетонных элементов на местное сжатие

6.1.27 Расчет фибробетонных элементов на местное сжатие (смятие) производят при действии сжимающей силы, приложенной на ограниченной площади нормально к поверхности фибробетонного элемента. При этом учитывают повышенное сопротивление сжатию фиброфибробетона в пределах грузовой площади (площади смятия) за счет объемного напряженного состояния фибробетона под грузовой площадью, зависящее от расположения грузовой площади на поверхности элемента.

При наличии косвенной арматуры в зоне местного сжатия учитывают дополнительное повышение сопротивления сжатию бетона под грузовой площадью за счет сопротивления косвенной арматуры.

Расчет элементов на местное сжатие при отсутствии косвенной арматуры производят согласно 6.1.28, а при наличии косвенной арматуры – согласно 6.1.29.

6.1.28 Расчет фибробетонных элементов на местное сжатие при отсутствии косвенной арматуры (см. рисунок 12) производят из условия:

$$N \le \psi \cdot R_{fb,loc} \cdot A_{b,loc}, \qquad (6.70)$$

где N – местная сжимающая сила от внешней нагрузки;

ψ – коэффициент, принимаемый равным 1,0 при равномерном и 0,75 при неравномерном распределении местной нагрузки по площади смятия;

$R_{fb,loc}$ – расчетное сопротивление фибробетона сжатию при местном действии сжимающей силы;

$A_{b,loc}$ – площадь приложения сжимающей силы (площадь смятия).

Значение $R_{fb,loc}$ определяют по формуле:

$$R_{fb,loc} = \varphi_{fb} \cdot R_{fb}, \qquad (6.71)$$

где φ_{fb} – коэффициент, определяемый по формуле:

$$\varphi_{fb} = 0{,}8 \cdot \sqrt{\frac{A_{b,\max}}{A_{b,loc}}}, \qquad (6.72)$$

но принимаемый не более 2,5 и не менее 1,0.

В формуле (6.72):

$A_{b,\max}$ – максимальная расчетная площадь, устанавливаемая по следующим правилам:

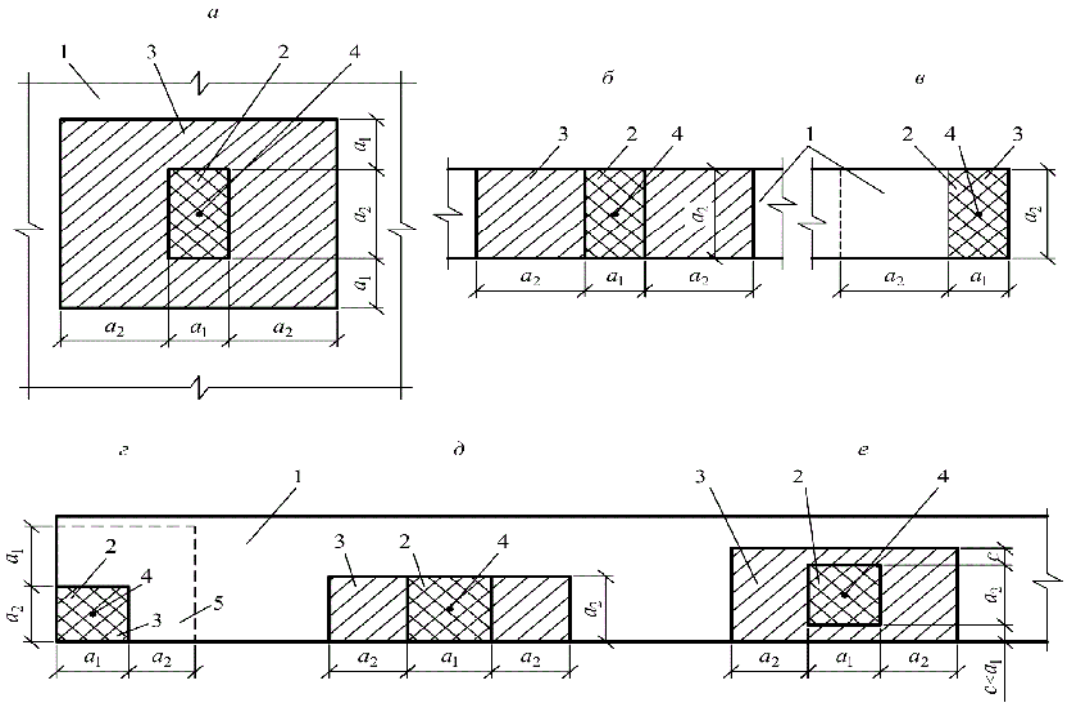
- центры тяжести площадей $A_{b,loc}$ и $A_{b,\max}$ совпадают;
- границы расчетной площади $A_{b,\max}$ отстоят от каждой стороны площади $A_{b,loc}$ на расстоянии, равном соответствующему размеру этих сторон (см. рисунок 12).

6.1.29 Расчет фибробетонных элементов на местное сжатие при наличии косвенной арматуры в виде сварных сеток производят из условия:

$$N \le \psi \cdot R_{bs,loc} \cdot A_{b,loc}, \qquad (6.73)$$

где $R_{bs,loc}$ – приведенное с учетом косвенной арматуры в зоне местного сжатия расчетное сопротивление фибробетона сжатию, определяемое по формуле:

$$R_{bs,loc} = R_{b,loc} + 2 \cdot \varphi_{s,xy} \cdot R_{s,xy} \cdot \mu_{s,xy}. \qquad (6.74)$$



1 – элемент, на который действует местная нагрузка; *2* – площадь смятия $A_{b,loc}$; *3* – максимальная расчетная площадь $A_{b,\max}$; *4* – центр тяжести площадей $A_{b,loc}$ и $A_{b,\max}$; *5* – минимальная зона армирования сетками, при которой косвенное армирование учитывается в расчете

***Рисунок 12* – Схемы для расчета фибробетонных элементов на местное сжатие при расположении местной нагрузки *(а* – вдали от краев элемента; *б* – по всей ширине элемента; *в* – у края (торца) элемента по всей его ширине; *г* – на углу элемента; *д* – у одного края элемента; *е* – вблизи одного края элемента)**

В формуле (6.74):

$\varphi_{s,xy}$ – коэффициент, определяемый по формуле:

$$\varphi_{s,xy} = \sqrt{\frac{A_{b,loc,ef}}{A_{b,loc}}}, \qquad (6.75)$$

где $A_{b,loc,ef}$ – площадь, заключенная внутри контура сеток косвенного армирования, считая по их крайним стержням, и принимаемая в формуле (6.75) не более $A_{b,\max}$;

$R_{s,xy}$ – расчетное сопротивление растяжению косвенной арматуры;

$\mu_{s,xy}$ – коэффициент косвенного армирования, определяемый по формуле:

$$\mu_{s,xy} = \frac{n_x \cdot A_{sx} \cdot l_x + n_y \cdot A_{sy} \cdot l_y}{A_{b,loc,ef} \cdot s}, \qquad (6.76)$$

где n_x, A_{sx}, l_x – число стержней, площадь сечения и длина стержня сетки, считая в осях крайних стержней, в направлении *X*, соответственно;

n_y, A_{sy}, l_y – то же, в направлении *Y*;

s – шаг сеток косвенного армирования.

Значения $R_{fb,loc}$, $A_{b,loc}$, ψ и N принимают согласно 6.1.28.

Значение местной сжимающей силы, воспринимаемое элементом с косвенным армированием (правая часть условия (6.73)), принимают не более удвоенного значения местной сжимающей силы, воспринимаемого элементом без косвенного армирования (правая часть условия (6.70)).

Косвенное армирование должно отвечать конструктивным требованиям, приведенным в СП 63.13330.

Расчет фибробетонных элементов на продавливание

6.1.30 Расчет на продавливание производят для плоских фибробетонных элементов (плит) при действии на них (нормально к плоскости элемента) местных, концентрированно приложенных усилий – сосредоточенных силы и изгибающего момента.

При расчете на продавливание рассматривают расчетное поперечное сечение, расположенное вокруг зоны передачи усилий на элемент на расстоянии $\frac{h_0}{2}$ нормально к его продольной оси, по поверхности которого действуют касательные усилия от сосредоточенных силы и изгибающего момента (см. рисунок 13).

Действующие касательные усилия по площади расчетного поперечного сечения должны быть восприняты фибробетоном с сопротивлением фибробетона осевому растяжению R_{ft} и поперечной арматурой, расположенной от грузовой площадки на расстоянии не более h_0 и не менее $\frac{h_0}{3}$, с сопротивлением растяжению R_{sw}.

При действии сосредоточенной силы касательные усилия, воспринимаемые фибробетоном и арматурой, принимают равномерно распределенными по всей площади расчетного поперечного сечения. При действии изгибающего момента касательные усилия, воспринимаемые фибробетоном и поперечной арматурой, принимают линейно изменяющимися по длине расчетного поперечного сечения в направлении действия момента с максимальными касательными усилиями противоположного знака у краев расчетного поперечного сечения в этом направлении.

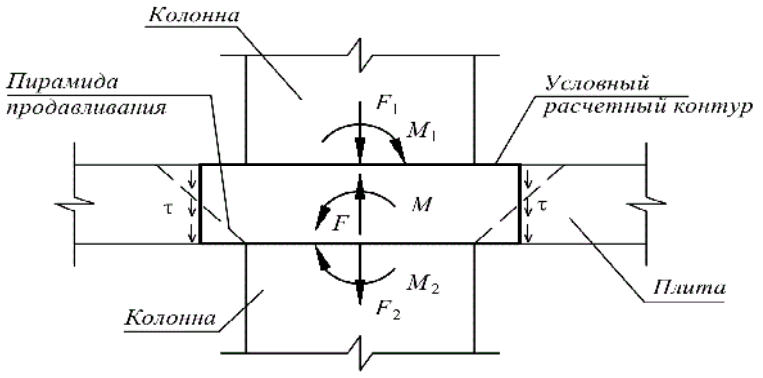


***Рисунок 13* – Условная модель для расчета на продавливание**

Расчет на продавливание при действии сосредоточенной силы и отсутствии поперечной арматуры производят согласно 6.2.16, при действии сосредоточенной силы и наличии поперечной арматуры – согласно 6.2.17, при действии сосредоточенных силы и изгибающего момента и отсутствии поперечной арматуры – согласно 6.2.18 и при действии сосредоточенных силы и изгибающего момента и наличии поперечной арматуры – согласно 6.2.20.

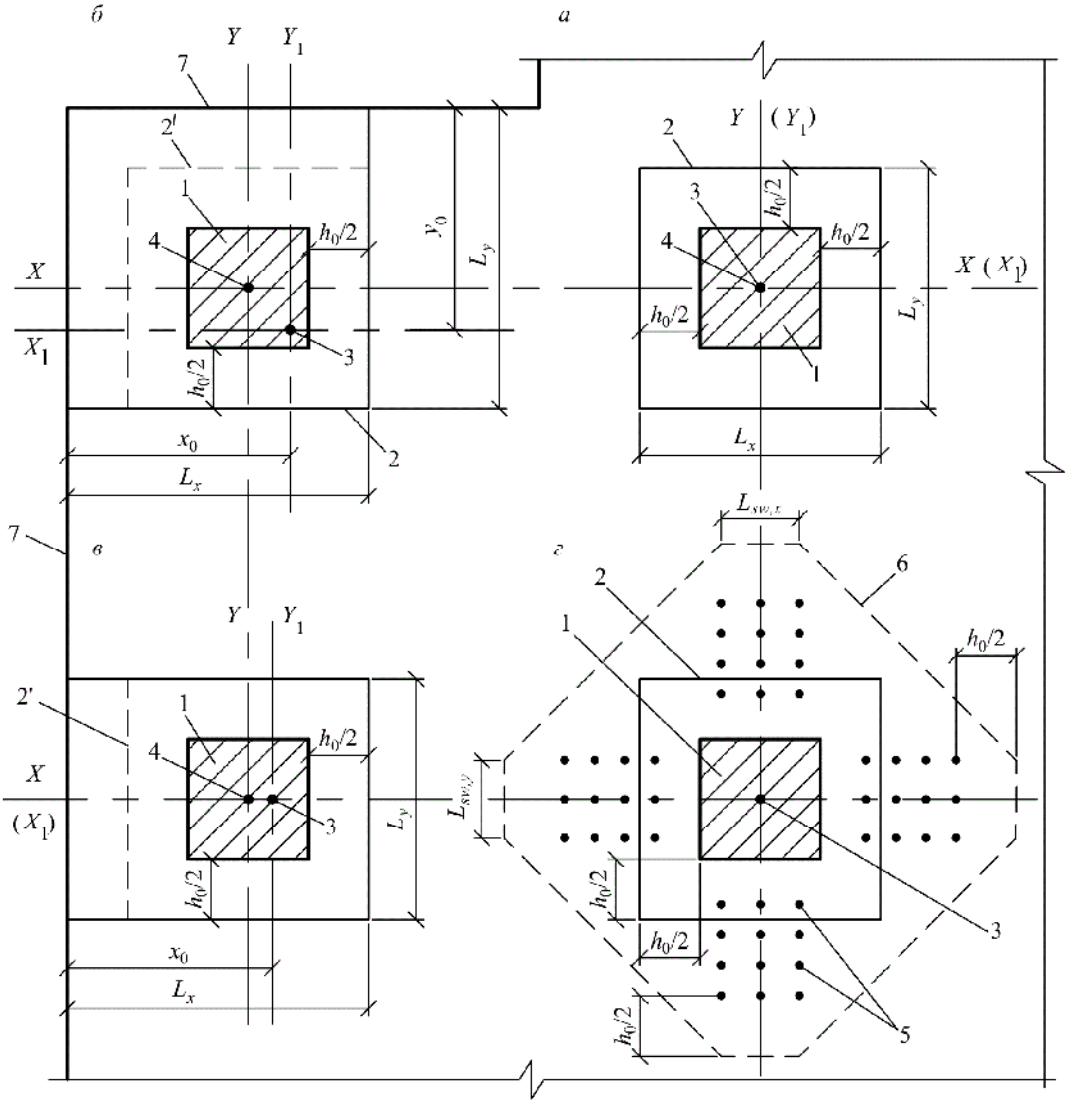
Расчетный контур поперечного сечения принимают: при расположении площадки передачи нагрузки внутри плоского элемента – замкнутым и расположенным вокруг площадки передачи нагрузки (см. рисунок 14, *а*, *г*), при расположении площадки передачи нагрузки у края или угла плоского элемента – в виде двух вариантов: замкнутым и расположенным вокруг площадки передачи нагрузки, и незамкнутым, следующим от краев плоского элемента (см. рисунок 14, *б*, *в*), в этом случае учитывают наименьшую несущую способность при двух вариантах расположения расчетного контура поперечного сечения.

В случае расположения отверстия в плите на расстоянии менее 6 h от угла или края площадки передачи нагрузки до угла или края отверстия, часть расчетного контура, расположенная между двумя касательными к отверстию, проведенными из центра тяжести площадки передачи нагрузки, в расчете не учитывается.

При действии момента M_{loc} в месте приложения сосредоточенной нагрузки половину этого момента учитывают при расчете на продавливание, а другую половину – при расчете по нормальным сечениям по ширине сечения, включающей ширину площадки передачи нагрузки и высоту сечения плоского элемента по обе стороны от площадки передачи нагрузки.

При действии сосредоточенных моментов и силы в условиях прочности соотношение между действующими сосредоточенными моментами M, учитываемыми при продавливании, и предельными M_{ult} принимают не более половины соотношения между действующим сосредоточенным усилием F и предельным F_{ult}.

При расположении сосредоточенной силы внецентренно относительно центра тяжести контура расчетного поперечного сечения значения изгибающих сосредоточенных моментов от внешней нагрузки определяют с учетом дополнительного момента от внецентренного приложения сосредоточенной силы относительно центра тяжести контура расчетного поперечного сечения с положительным или обратным знаком по отношению к моментам в колонне.



а – площадка приложения нагрузки внутри плоского элемента;
б, *в* – то же, у края плоского элемента;
г – при крестообразном расположении поперечной арматуры

1 – площадь приложения нагрузки; *2* – расчетный контур поперечного сечения; 2’ – второй вариант расположения расчетного контура; *3* – центр тяжести расчетного контура (место пересечения осей X_1 и Y_1); *4* – центр тяжести площадки приложения нагрузки (место пересечения осей *X* и *Y*); *5* – поперечная арматура; *6* – контур расчетного поперечного сечения без учета в расчете поперечной арматуры; *7* – граница (край) плоского элемента

***Рисунок 14* – Схема расчетных контуров поперечного сечения при продавливании**

Расчет элементов на продавливание при действии сосредоточенной силы

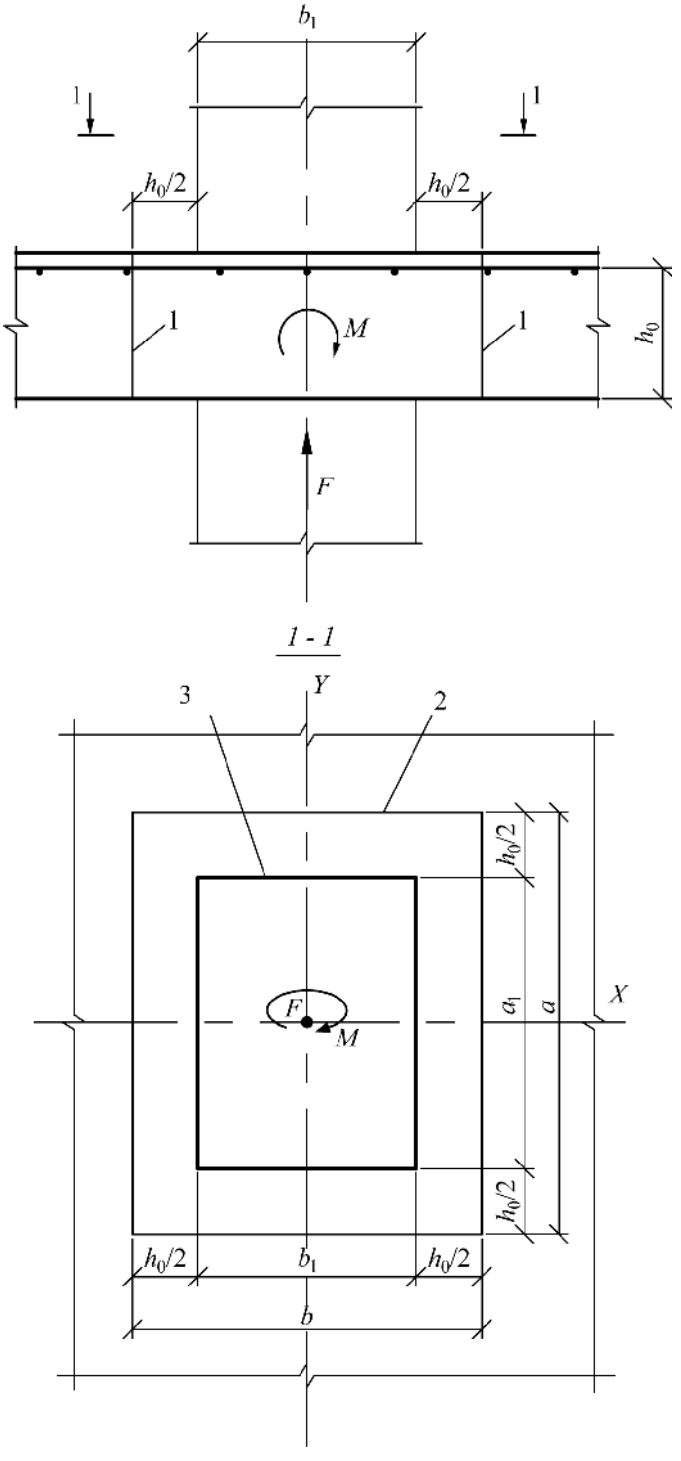
6.1.31 Расчет элементов без поперечной арматуры на продавливание при действии сосредоточенной силы производят из условия:

$$F \le F_{fb,ult} \quad , \tag{6.77}$$

где F – сосредоточенная сила от внешней нагрузки;
$F_{fb,ult}$ – предельное усилие, воспринимаемое фибробетоном.
Усилие $F_{fb,ult}$ определяют по формуле:

$$F_{fb,ult} = R_{ft} \cdot A_b \,, \tag{6.78}$$

где A_b – площадь расчетного поперечного сечения, расположенного на расстоянии 0,5 h_0 от границы площади приложения сосредоточенной силы F с рабочей высотой сечения h_0 (см. рисунок 15).



1 – расчетное поперечное сечение; *2* – контур расчетного поперечного сечения; *3* – контур площадки приложения нагрузки

***Рисунок 15*– Схема для расчета фибробетонных элементов без поперечной арматуры на продавливание**

Площадь A_b определяют по формуле:

$$A_b = u \cdot h_0, \quad (6.79)$$

где u – периметр контура расчетного поперечного сечения;

h_0 – приведенная рабочая высота сечения $h_0 = 0,5(h_{0x} + h_{0y})$,

здесь h_{0x} и h_{0y} – рабочая высота сечения для продольной арматуры, расположенной в направлении осей X и Y.

6.1.32 Расчет элементов с поперечной арматурой на продавливание при действии сосредоточенной силы (см. рисунок 16) производят из условия

$$F \le F_{fb,ult} + F_{sw,ult}, \quad (6.80)$$

где $F_{sw,ult}$ – предельное усилие, воспринимаемое поперечной арматурой при продавливании;

$F_{fb,ult}$ – предельное усилие, воспринимаемое фибробетоном, определяемое согласно 6.2.16.

Усилие $F_{sw,ult}$, воспринимаемое поперечной арматурой, нормальной к продольной оси элемента и расположенной равномерно вдоль контура расчетного поперечного сечения, определяют по формуле:

$$F_{sw,ult} = 0,8 q_{sw} \cdot u, \quad (6.81)$$

где q_{sw} – усилие в поперечной арматуре на единицу длины контура расчетного поперечного сечения, расположенной в пределах расстояния $0,5h_0$ по обе стороны от контура расчетного сечения

$$q_{sw} = \frac{R_{sw} \cdot A_{sw}}{s_w}, \quad (6.82)$$

здесь A_{sw} – площадь сечения поперечной арматуры с шагом s_w, расположенная в пределах расстояния $0,5h_0$ по обе стороны от контура расчетного поперечного сечения по периметру контура расчетного поперечного сечения;

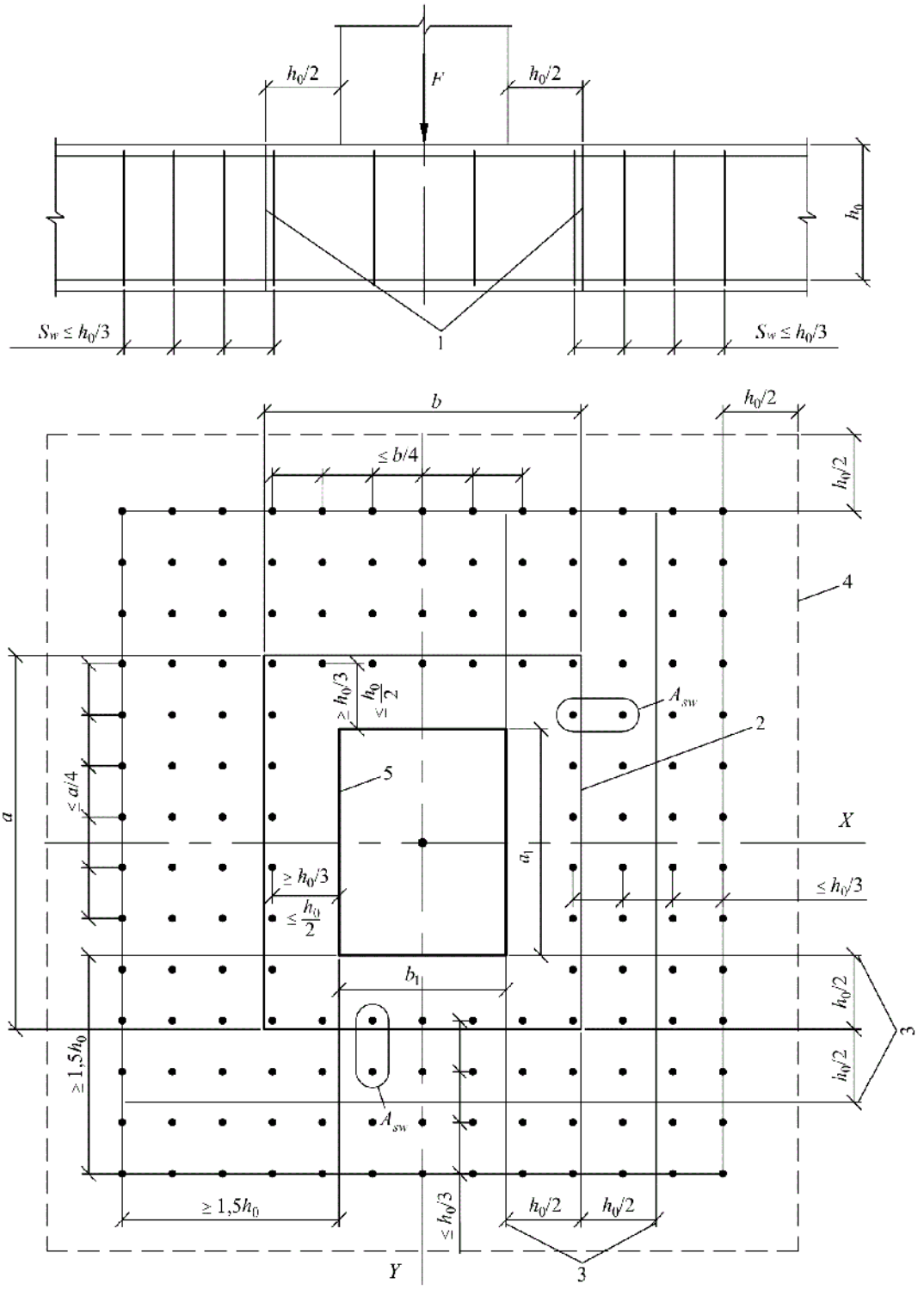
u – периметр контура расчетного поперечного сечения, определяемый согласно 6.1.31.

При расположении поперечной арматуры не равномерно по контуру расчетного поперечного сечения, а сосредоточенно у осей площадки передачи нагрузки (крестообразное расположение поперечной арматуры) периметр контура u для поперечной арматуры принимают по фактическим длинам участков расположения поперечной арматуры L_{swx} и L_{swy} по расчетному контуру продавливания (см. рисунок 16, *г*).

Значение $F_{fb,ult} + F_{sw,ult}$ принимают не более $2F_{fb,ult}$ Поперечную арматуру учитывают в расчете при $F_{sw,ult}$ не менее $0,25\ F_{b,ult}$.

За границей расположения поперечной арматуры расчет на продавливание производят согласно 6.1.31, рассматривая контур расчетного поперечного сечения на расстоянии $0,5h_0$ от границы расположения поперечной арматуры (см. рисунок 16). При сосредоточенном расположении поперечной арматуры по осям площадки передачи нагрузки, кроме того, расчетный контур поперечного сечения фибробетона принимают по диагональным линиям, следующим от края расположения поперечной арматуры (см. рисунок 14, *г*).

Поперечная арматура должна удовлетворять конструктивным требованиям, приведенным в СП 63.13330. При нарушении указанных в СП 63.13330 конструктивных требований в расчете на продавливание следует учитывать только поперечную арматуру, пересекающую пирамиду продавливания, при обеспечении условий ее анкеровки.



1 – расчетное поперечное сечение; *2* – контур расчетного поперечного сечения; *3* – границы зоны, в пределах которых в расчете учитывается поперечная арматура; *4* – контур расчетного поперечного сечения без учета в расчете поперечной арматуры; *5* – контур площадки приложения нагрузки

***Рисунок 16* – Схема для расчета фибробетонных плит с вертикальной равномерно распределенной поперечной арматурой на продавливание**

Расчет элементов на продавливание при действии сосредоточенных силы и изгибающего момента

6.1.33 Расчет элементов без поперечной арматуры на продавливание при совместном действии сосредоточенных силы и изгибающего момента (см. рисунок 15) производят из условия:

$$\frac{F}{F_{fb,ult}} + \frac{M}{M_{fb,ult}} \le 1, \qquad (6.83)$$

где F – сосредоточенная сила от внешней нагрузки;

M – сосредоточенный изгибающий момент от внешней нагрузки, учитываемый при расчете на продавливание (6.1.30);

$F_{b,ult}$ и $M_{b,ult}$ – предельные сосредоточенные сила и изгибающий момент, которые могут быть восприняты фибробетоном в расчетном поперечном сечении при их раздельном действии.

В каркасных зданиях с плоскими перекрытиями сосредоточенный изгибающий момент M_{loc} равен суммарному изгибающему моменту в сечениях верхней и нижней колонн, примыкающих к перекрытию в рассматриваемом узле.

Предельную силу $F_{b,ult}$ определяют согласно 6.1.31.

Предельный изгибающий момент $M_{b,ult}$ определяют по формуле:

$$M_{fb,ult} = R_{fb,ult} \cdot W_{fb} \cdot h_0, \qquad (6.84)$$

где W_{fb} – момент сопротивления расчетного поперечного сечения, определяемый согласно 6.1.35.

При действии изгибающих моментов в двух взаимно перпендикулярных плоскостях расчет производят из условия:

$$\frac{F}{F_{fb,ult}} + \frac{M_x}{M_{fb,x,ult}} + \frac{M_y}{M_{fb,y,ult}} \le 1, \qquad (6.85)$$

где F, M_x и M_y – сосредоточенные сила и изгибающие моменты в направлениях осей X и Y, учитываемые при расчете на продавливание (6.1.30), от внешней нагрузки;

$F_{fb,ult}$, $M_{fb,x,ult}$, $M_{fb,y,ult}$ – предельные сосредоточенные сила и изгибающие моменты в направлениях осей X и Y, которые могут быть восприняты фибробетоном в расчетном поперечном сечении при их раздельном действии.

Усилие $F_{fb,ult}$ определяют согласно 6.1.31.

Усилия $M_{fb,x,ult}$ и $M_{fb,y,ult}$ определяют согласно указаниям, приведенным выше, при действии момента в плоскости осей X и Y соответственно.

6.1.34 Расчет прочности элементов с поперечной арматурой на продавливание при действии сосредоточенной силы и изгибающих моментов в двух взаимно перпендикулярных плоскостях производят из условия:

$$\frac{F}{F_{fb,ult} + F_{sw,ult}} + \frac{M_x}{M_{fb,x,ult} + M_{sw,x,ult}} + \frac{M_y}{M_{fb,y,ult} + M_{sw,y,ult}} \le 1, \qquad (6.86)$$

где F, M_x и M_y – см. 6.1.33;

$F_{b,ult}$, $M_{b,x,ult}$ и $M_{b,y,ult}$ – предельные сосредоточенные сила и изгибающие моменты в направлениях осей X и Y, которые могут быть восприняты фибробетоном в расчетном поперечном сечении при их раздельном действии;

$F_{sw,ult}$, $M_{sw,x,ult}$ и $M_{sw,y,ult}$ – предельные сосредоточенные сила и изгибающие моменты в направлениях осей X и Y, которые могут быть восприняты поперечной арматурой при их раздельном действии.

Усилия $F_{b,ult}$, $M_{fb,x,ult}$, $M_{fb,y,ult}$ и $F_{sw,ult}$ определяют согласно указаниям 6.1.32 и 6.1.33.

Усилия $M_{sw,x,ult}$ и $M_{sw,y,ult}$, воспринимаемые поперечной арматурой, нормальной к продольной оси элемента и расположенной равномерно вдоль контура расчетного

сечения, определяют при действии изгибающего момента, соответственно в направлении осей *X* и *Y* по формуле:

$$M_{sw,ult} = 0,8 \cdot q_{sw} \cdot W_{sw}, \quad (6.87)$$

где q_{sw} и W_{sw} – определяют согласно 6.1.32 и 6.1.36.

Значения $F_{b,ult} + F_{sw,ult}$, $M_{fbx,ult} + M_{sw,x,ult}$, $M_{fby,ult} + M_{sw,y,ult}$ в условии (6.86) принимают не более $2F_{b,ult}$, $2M_{fb,x,ult}$, $2M_{fb,y,ult}$ соответственно.

Поперечная арматура должна отвечать конструктивным требованиям, приведенным в СП 63.13330. При нарушении указанных в СП 63.13330 конструктивных требований в расчете на продавливание следует учитывать только поперечную арматуру, пересекающую пирамиду продавливания, при обеспечении условий ее анкеровки.

6.1.35 В общем случае значения момента сопротивления расчетного контура фибробетона при продавливании $W_{fbx(y)}$ в направлениях взаимно перпендикулярных осей *X* и *Y* определяют по формуле:

$$W_{fbx(y)} = \frac{I_{fbx(y)}}{x(y)_{\max}}, \quad (6.88)$$

где $I_{fbx(y)}$ – момент инерции расчетного контура относительно осей Y_1 или X_1, проходящих через его центр тяжести (см. рисунок 14);

$x(y)_{\max}$ – максимальное расстояние от расчетного контура до его центра тяжести.

Значение момента инерции $I_{fbx(y)}$ определяют как сумму моментов инерции $I_{fbx(y)i}$ отдельных участков расчетного контура поперечного сечения относительно центральных осей, проходящих через центр тяжести расчетного контура, принимая условно ширину каждого участка равной единице.

Положение центра тяжести расчетного контура относительно выбранной оси определяют по формуле:

$$x(y)_0 = \frac{\Sigma L_i \cdot x_i(y_i)_0}{\sum L_i}, \quad (6.89)$$

где L_i – длина отдельного участка расчетного контура;

$x_i(y_i)_0$ – расстояние от центров тяжести отдельных участков расчетного контура до выбранных осей.

При расчетах принимают наименьшие значения моментов сопротивления W_{fbx} и W_{fby}.

6.1.36 Значения моментов сопротивления поперечной арматуры при продавливании $W_{sw,x(y)}$ в том случае, когда поперечная арматура расположена равномерно вдоль расчетного контура продавливания в пределах зоны, границы которой отстоят на расстоянии $\frac{h_0}{2}$ в каждую сторону от контура продавливания фибробетона (см. рисунок 16), принимают равными соответствующим значениям W_{fbx} и W_{fby}.

При расположении поперечной арматуры в плоском элементе сосредоточенно по осям грузовой площадки, например, по оси колонн (крестообразное расположение поперечной арматуры в перекрытии), моменты сопротивления поперечной арматуры определяют по тем же правилам, что и моменты сопротивления фибробетона, принимая соответствующую фактическую длину ограниченного участка расположения поперечной арматуры по расчетному контуру продавливания L_{swx} и L_{swy} (см. рисунок 14, *г*).

6.2 Расчет элементов фибробетонных конструкций по предельным состояниям второй группы

6.2.1 Расчеты по предельным состояниям второй группы включают расчеты:

- по образованию трещин;
- по раскрытию трещин;
- по деформациям.

6.2.2 Расчет по образованию трещин производят, когда необходимо обеспечить отсутствие трещин, а также как вспомогательный при расчете по раскрытию трещин и по деформациям.

6.2.3 При расчете по образованию трещин в целях их недопущения коэффициент надежности по нагрузке принимают γ_f>1,0 (как при расчете по прочности). При расчете по раскрытию трещин и по деформациям (включая вспомогательный расчет по образованию трещин) принимают коэффициент надежности по нагрузке γ_f = 1,0.

Расчет фибробетонных элементов по образованию и раскрытию трещин

6.2.4 Расчет фибробетонных элементов по образованию трещин производят из условия:

$$M > M_{crc}, \tag{6.90}$$

где M – изгибающий момент от внешней нагрузки относительно оси, нормальной к плоскости действия момента и проходящей через центр тяжести приведенного поперечного сечения элемента;

M_{crc} – изгибающий момент, воспринимаемый нормальным сечением элемента при образовании трещин, определяемый по формуле (6.94).

6.2.5 В тех случаях, когда выполняются условия (6.90) или (6.91), выполняют расчет по раскрытию трещин. Расчет фибробетонных элементов производят по непродолжительному и продолжительному раскрытию трещин.

Непродолжительное раскрытие трещин определяют от совместного действия постоянных и временных (длительных и кратковременных) нагрузок, продолжительное – только от постоянных и временных длительных нагрузок.

6.2.6 Расчет по раскрытию трещин производят из условия:

$$a_{crc} \le a_{crc,ult}. \quad , \tag{6.91}$$

где a_{crc} – ширина раскрытия трещин от действия внешней нагрузки, определяемая согласно 6.2.7, 6.2.14 – 6.2.16;

$a_{crc,ult}$ – предельно допустимая ширина раскрытия трещин.

Значения $a_{crc,ult}$ принимают равными:

а) из условия обеспечения сохранности арматуры:

- классов А240…А600, В500:
  - 0,3 мм – при продолжительном раскрытии трещин;
  - 0,4 мм – при непродолжительном раскрытии трещин;
- классов А800, А1000, $В_р$1200-$В_р$1400, К1400, К1500 (К-19) и К1500 (К-7), К1600 диаметром 12 мм:
  - 0,2 мм – при продолжительном раскрытии трещин;
  - 0,3 мм – при непродолжительном раскрытии трещин;
- классов $В_р$1500, К1500 (К-7), К1600 диаметром 6 и 9 мм:
  - 0,1 мм – при продолжительном раскрытии трещин;
  - 0,2 мм – при непродолжительном раскрытии трещин;

б) из условия ограничения проницаемости конструкций:

- 0,2 мм – при продолжительном раскрытии трещин;
- 0,3 мм – при непродолжительном раскрытии трещин.

6.2.7 Расчет фибробетонных элементов следует производить по продолжительному и по непродолжительному раскрытию нормальных и наклонных трещин.

Ширину продолжительного раскрытия трещин определяют по формуле:

$$a_{crc} = a_{crc1}, \tag{6.92}$$

а ширину непродолжительного раскрытия трещин – по формуле:

$$a_{crc} = a_{crc1} + a_{crc2} - a_{crc3}, \tag{6.93}$$

где a_{crc1} – ширина раскрытия трещин от продолжительного действия постоянных и временных длительных нагрузок;

a_{crc2} – ширина раскрытия трещин от непродолжительного действия постоянных и временных (длительных и кратковременных) нагрузок;

a_{crc3} – ширина раскрытия трещин от непродолжительного действия постоянных и временных длительных нагрузок.

Определение момента образования трещин, нормальных к продольной оси элемента

6.2.8 Изгибающий момент M_{crc} при образовании трещин в общем случае определяется по деформационной модели согласно 6.2.13.

Для элементов прямоугольного, таврового или двутаврового сечения с арматурой, расположенной у верхней и нижней граней, момент трещинообразования с учетом неупругих деформаций растянутого фибробетона допускается определять согласно указаниям 6.2.10 – 6.2.12.

6.2.9 Допускается момент образования трещин определять без учета неупругих деформаций растянутого фибробетона по указаниям 6.2.12, принимая в формуле (6.94) $W_{pl}=W_{red}$ и значение $R_{fbt,ser}$ вместо значения $R_{ft,ser}$ Если при этом условие (6.91) или условие (6.113) не удовлетворяются, то момент образования трещин следует определять с учетом неупругих деформаций растянутого фибробетона.

6.2.10 Момент образования трещин с учетом неупругих деформаций растянутого фибробетона определяют в соответствии со следующими положениями:

- сечения после деформирования остаются плоскими;

- эпюру напряжений в сжатой зоне фибробетона принимают треугольной формы, как для упругого тела (см. рисунок 17);

- эпюру напряжений в растянутой зоне фибробетона принимают трапециевидной формы с напряжениями, не превышающими расчетных значений сопротивления фибробетона растяжению $R_{ft,ser}$;

- относительную деформацию крайнего растянутого волокна фибробетона принимают равной ее предельному значению $\varepsilon_{fbt,ult}$ при кратковременном действии нагрузки по 6.1.21; при двухзначной эпюре деформаций в сечении элемента $\varepsilon_{fbt,ult} = 0{,}00015$;

- напряжения в арматуре принимают в зависимости от относительных деформаций как для упругого тела.

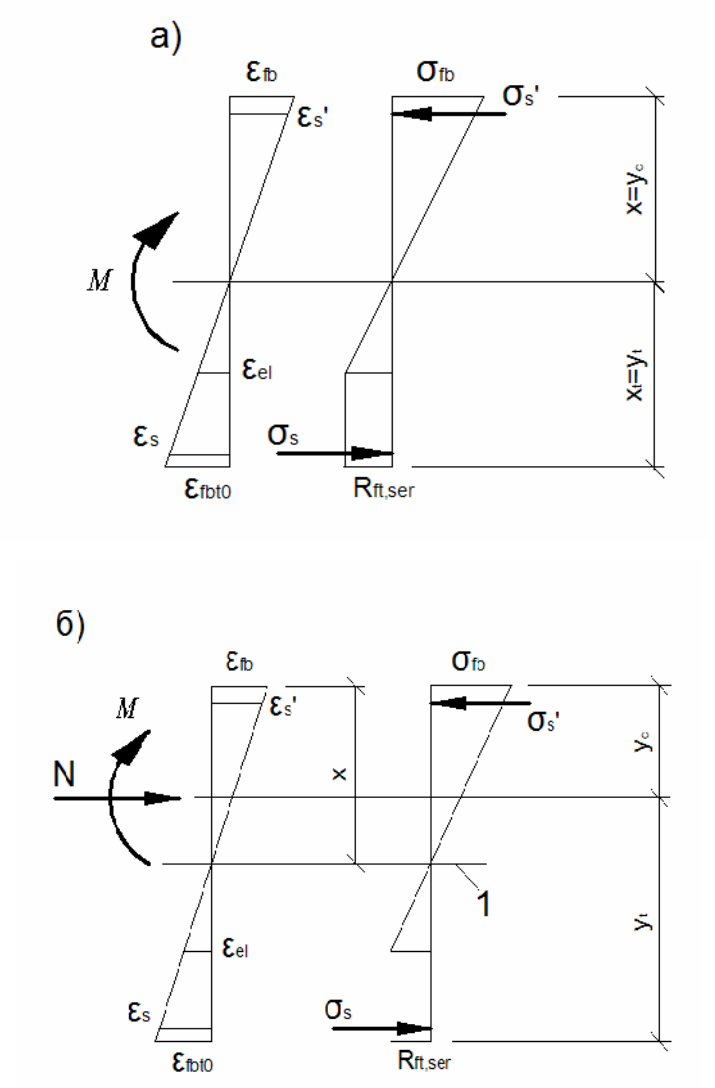
6.2.11 Момент образования трещин с учетом неупругих деформаций растянутого фибробетона определяют по формуле:

$$M_{crc} = R_{ft,ser} \cdot W_{pl} \pm N \cdot e_x , \qquad (6.94)$$

где W_{pl} – упругопластический момент сопротивления сечения для крайнего растянутого волокна фибробетона, определяемый с учетом положений 6.2.10;

e_x – расстояние от точки приложения продольной силы N (расположенной в центре тяжести приведенного сечения элемента) до ядровой точки, наиболее удаленной от растянутой зоны, трещинообразование которой проверяется.

В формуле (6.94) знак «плюс» принимают при сжимающей продольной силе N, «минус» – при растягивающей силе.



1 – Уровень центра тяжести приведенного поперечного сечения

***Рисунок 17* – Схема напряженно-деформированного состояния сечения элемента при проверке образования трещин при действии изгибающего момента (а) и изгибающего момента и продольной силы (б)**

Для прямоугольных сечений и тавровых сечений с полкой, расположенной в сжатой зоне, значение W_{pl} при действии момента в плоскости оси симметрии допускается принимать равным:

$$W_{pl} = 1{,}3 \cdot W_{red}\,, \tag{6.95}$$

где W_{red} – упругий момент сопротивления приведенного сечения по растянутой зоне сечения, определяемый в соответствии с 6.2.12.

6.2.12 Момент сопротивления W_{red} и расстояние e_x определяют по формулам:

$$W_{red} = \frac{I_{red}}{y_t}; \tag{6.96}$$

$$e_x = \frac{W_{red}}{A_{red}}, \tag{6.97}$$

где I_{red} – момент инерции приведенного сечения элемента относительно его центра тяжести:

$$I_{red} = I + I_s + I_s^{'}, \quad (6.98)$$

здесь I, I_s, I'_s – моменты инерции сечений фибробетона, растянутой арматуры и сжатой арматуры соответственно;

A_{red} – площадь приведенного поперечного сечения элемента, определяемая по формуле:

$$A_{red} = A + A_s \cdot \alpha + A'_s \cdot \alpha, \quad (6.99)$$

здесь α – коэффициент приведения арматуры к фибробетону:

$$\alpha = \frac{E_s}{E_{fb}}; \quad (6.100)$$

A, A_s, A'_s – площади поперечного сечения фибробетона, растянутой и сжатой арматуры соответственно;

y_t – расстояние от наиболее растянутого волокна фибробетона до центра тяжести приведенного поперечного сечения элемента:

$$y_t = \frac{S_{t,red}}{A_{red}}, \quad (6.101)$$

здесь $S_{t,red}$ – статический момент площади приведенного поперечного сечения элемента относительно наиболее растянутого волокна фибробетона.

Допускается момент сопротивления W_{red} определять без учета арматуры.

6.2.13 Определение момента образования трещин на основе нелинейной деформационной модели производят исходя из общих положений, приведенных в 6.1.14–6.1.15, но при этом расчетные характеристики материалов принимают для предельных состояний второй группы.

Значение M_{crc} определяют из решения системы уравнений, представленных в 6.1.16 и условия (6.44), принимая в нем относительную деформацию фибробетона $\varepsilon_{bt,\max}$ у растянутой грани элемента от действия внешней нагрузки, равной предельному значению относительной деформации фибробетона при растяжении $\varepsilon_{bt,ult}$, определяемому согласно указаниям 6.1.21.

Расчет ширины раскрытия трещин, нормальных к продольной оси элемента

6.2.14 Ширину раскрытия нормальных трещин $a_{crc,i}$ (i=1, 2, 3 – см. 6.2.7) определяют по формуле:

$$a_{crc,i} = \varphi_1 \cdot \varphi_3 \cdot \psi_s \cdot \frac{\sigma_s}{E_s} \cdot l_s, \quad (6.102)$$

где φ_1 – коэффициент, учитывающий продолжительность действия нагрузки, принимаемый равным:

1,0 – при непродолжительном действии нагрузки;

1,4 – при продолжительном действии нагрузки;

ψ_s – коэффициент, учитывающий неравномерное распределение относительных деформаций растянутой арматуры между трещинами; допускается принимать коэффициент ψ_s = 1; если при этом условие (6.91) не удовлетворяется, то значение ψ_s следует определять по формуле (6.112);

σ_s – напряжение в продольной растянутой арматуре в нормальном сечении с трещиной от соответствующей внешней нагрузки, определяемое согласно 6.2.15;

φ_3 – коэффициент, учитывающий характер нагружения, принимаемый равным:

1,0 – для элементов изгибаемых и внецентренно сжатых;

1,2 – для растянутых элементов;

l_s – базовое (без учета влияния вида поверхности арматуры) расстояние между смежными нормальными трещинами, определяемое согласно 6.2.16.

6.2.15 Значения напряжения σ_s в растянутой арматуре изгибаемых элементов определяют по формуле:

$$\sigma_s = \frac{M\,(h_0 - y_c)}{I_{red}} \cdot \alpha_{s1}, \qquad (6.103)$$

где I_{red}, y_c – момент инерции и высота сжатой зоны приведенного поперечного сечения элемента, определяемые с учетом площади сечения сжатой и растянутой зон фибробетона, площадей сечения растянутой и сжатой арматуры согласно 6.2.26, принимая в соответствующих формулах значения коэффициентов приведения арматуры и фибробетона растянутой зоны к фибробетону равными:

$$\alpha_{s1} = \alpha_{s2} = \frac{E_s}{E_{fb,red}}; \quad \alpha_{fbt} = \frac{E_{fbt1}}{E_{fb,red}}, \qquad (6.104)$$

здесь $E_{fb,red}$ – приведенный модуль деформации сжатого фибробетона, учитывающий неупругие деформации сжатого фибробетона и определяемый по формуле:

$$E_{fb,red} = \frac{R_{fb,n}}{\varepsilon_{fb1,red}}. \qquad (6.105)$$

Относительную деформацию фибробетона $\varepsilon_{fb1,red}$ принимают равной 0,0015.

Для изгибаемых элементов $y_c = x$ (см. рисунок 18), где x – высота сжатой зоны фибробетона, определяемая согласно 6.2.27 с учетом (6.104).

Допускается напряжение σ_s определять по формуле:

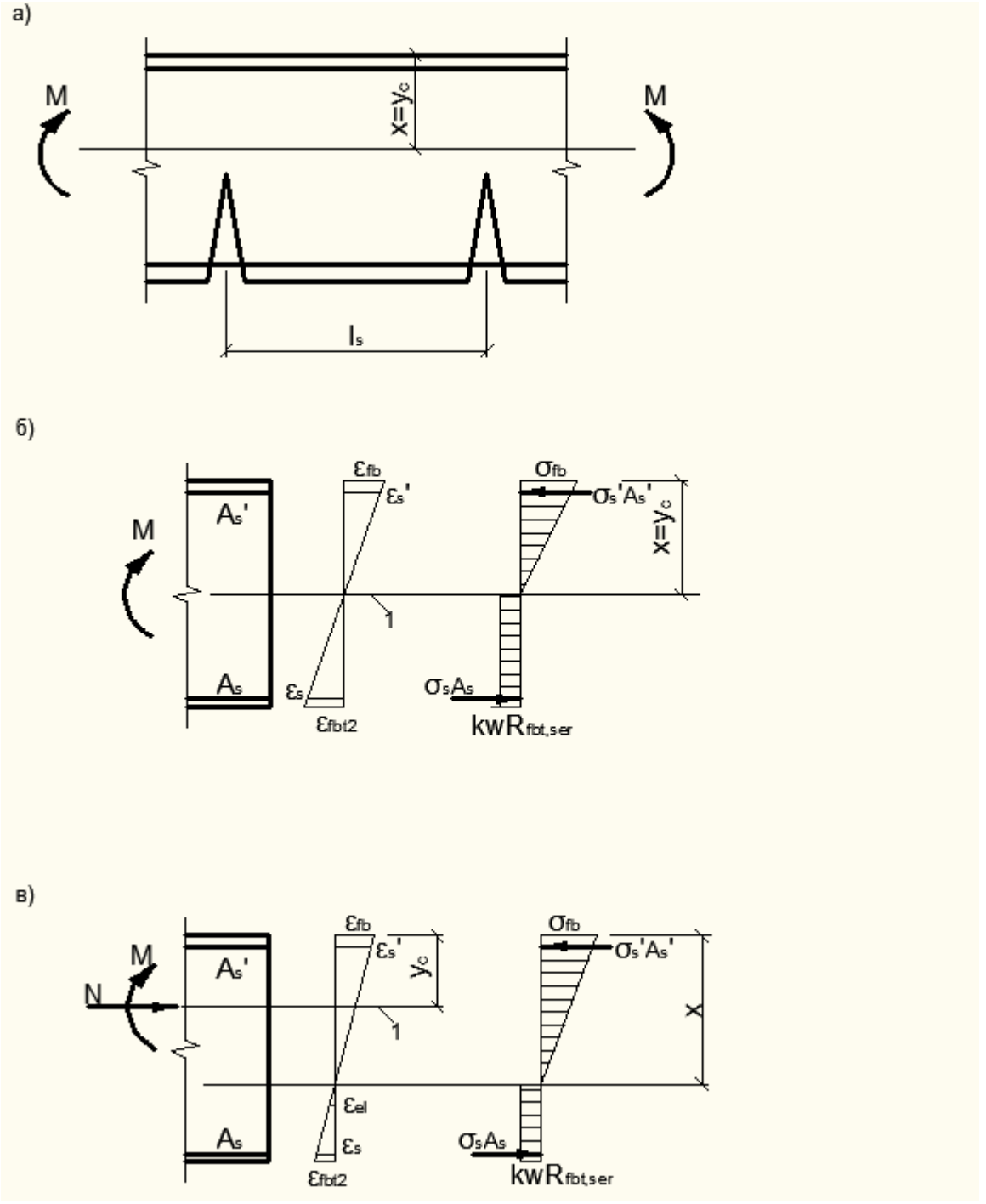
$$\sigma_s = \frac{M - k \cdot R_{fbt,ser} \cdot A_{bt} \cdot z_{bt}}{z_s \cdot A_s}, \qquad (6.106)$$

где k =0,56;

A_{bt} – площадь растянутой зоны сечения элемента;

z_{bt} – расстояние от точки приложения равнодействующей усилий в растянутой зоне элемента до точки приложения равнодействующей усилий в сжатой зоне элемента;

z_s – расстояние от центра тяжести растянутой арматуры до точки приложения равнодействующей усилий в сжатой зоне элемента.



1 – уровень центра тяжести приведенного поперечного сечения

***Рисунок 18* – Схема напряженно-деформированного состояния элемента с трещинами при действии изгибающего момента (а, б), изгибающего момента и продольной силы (в)**

Для элементов прямоугольного поперечного сечения при отсутствии (или без учета) сжатой арматуры значения z_s и z_{bt} в (6.106) определяют по формулам:

$$z_s = h_0 - \frac{x}{3}; \quad z_{bt} = \frac{3 \cdot h + x}{6}. \tag{6.107}$$

При действии изгибающего момента M и продольной силы N напряжение σ_s в растянутой арматуре определяют по формуле:

$$\sigma_s = \left[\frac{M\left(h_0 - y_c\right)}{I_{red}} \pm \frac{N}{A_{red}} \right] \cdot \alpha_{s1}, \qquad (6.108)$$

где A_{red}, y_c – площадь приведенного поперечного сечения элемента и расстояние от наиболее сжатого волокна фибробетона до центра тяжести приведенного сечения, определяемые по общим правилам расчета геометрических характеристик сечений упругих элементов с учетом площади сечения сжатой и растянутой зон фибробетона, площадей сечения растянутой и сжатой арматуры согласно 6.2.27, принимая коэффициенты приведения арматуры и фибробетона растянутой зоны к фибробетону по (6.104).

Допускается напряжение σ_s определять по формуле:

$$\sigma_s = \frac{N \cdot (e_s \pm z_s) - k \cdot R_{fbt,ser} \cdot A_{bt} \cdot z_{bt}}{A_s \cdot z_s}, \qquad (6.109)$$

где e_s – расстояние от центра тяжести растянутой арматуры до точки приложения продольной силы N с учетом эксцентриситета, равного $\frac{M}{N}$.

Для элементов прямоугольного сечения при отсутствии (или без учета) сжатой арматуры значения z_s и z_{bt} в (6.109) допускается определять по формулам (6.107), в которые вместо x следует подставлять x_m – высоту сжатой зоны фибробетона с учетом влияния продольной силы, определяемую согласно 6.2.27, принимая коэффициенты приведения арматуры и фибробетона растянутой зоны к фибробетону по (6.104).

В формулах (6.108) и (6.109) знак «плюс» принимают при растягивающей, а знак «минус» при сжимающей продольной силе.

Напряжения σ_s не должны превышать значения расчетных сопротивлений арматуры растяжению для предельных состояний второй группы $R_{s,ser}$.

6.2.16 Значения базового расстояния между трещинами l_s определяют по формуле:

$$l_s = k_f \cdot (50 + 0{,}5 \cdot \varphi_2 \cdot \varphi_3 \cdot \frac{d_s}{\mu_{fv}}), \qquad (6.110)$$

и принимают не более h.

В формуле (6.110):

k_f – коэффициент, принимаемый равным:

1,0 – при $\frac{l_f}{d_t} < 50$;

$50 \cdot \frac{l_f}{d_f}$ – при $50 \le \frac{l_f}{d_f} \le 100$;

0,5 – при $\frac{l_f}{d_f} > 100$,

где d_f и l_f – диаметр и длина фибры;

φ_2 – коэффициент, учитывающий профиль продольной арматуры, принимаемый равным:

0,5 – для арматуры периодического профиля;

0,8 – для гладкой арматуры;

φ_3 – коэффициент, учитывающий характер нагружения, принимаемый равным:

0,5 – для элементов изгибаемых и внецентренно сжатых;

1,0 – для растянутых элементов;

d_s – номинальный диаметр арматуры;

μ_{fv} – коэффициент фибрового армирования по объему.

Значения A_{bt} определяют по высоте растянутой зоны фибробетона x_t, используя правила расчета момента образования трещин согласно указаниям 6.2.8 – 6.2.13.

6.2.17 Значения коэффициента ψ_s определяют по формуле:

$$\psi_s = 1 - 0,8 \cdot \frac{\sigma_{s,crc}}{\sigma_s}\ , \qquad (6.111)$$

где $\sigma_{s,crc}$ – напряжение в продольной растянутой арматуре в сечении с трещиной сразу после образования нормальных трещин, определяемое по указаниям 6.2.15, принимая в соответствующих формулах значения $M=M_{crc}$;

σ_s – то же, при действии рассматриваемой нагрузки.

Для изгибаемых элементов значение коэффициента ψ_s допускается определять по формуле:

$$\psi_s = 1 - 0,8 \cdot \frac{M_{crc}}{M}, \qquad (6.112)$$

где M_{crc} определяют по формуле (6.94).

Расчет элементов фибробетонных конструкций по деформациям

6.2.18 Расчет элементов фибробетонных конструкций по деформациям производят с учетом эксплуатационных требований, предъявляемых к конструкциям.

Расчет по деформациям следует производить на действие:

- постоянных, временных длительных и кратковременных нагрузок при ограничении деформаций технологическими или конструктивными требованиями;
- постоянных и временных длительных нагрузок при ограничении деформаций эстетическими требованиями.

6.2.19 Значения предельно допустимых деформаций элементов принимают согласно СП 20.13330 и нормативным документам на отдельные виды конструкций.

Расчет фибробетонных элементов по прогибам

6.2.20 Расчет фибробетонных элементов по прогибам производят из условия:

$$f \le f_{ult}\,, \qquad (6.113)$$

где f – прогиб фибробетонного элемента от действия внешней нагрузки;

f_{ult} – значение предельно допустимого прогиба фибробетонного элемента.

Прогибы фибробетонных конструкций определяют по общим правилам строительной механики в зависимости от изгибных, сдвиговых и осевых деформационных характеристик фибробетонного элемента в сечениях по его длине (кривизн, углов сдвига и т. д.).

В тех случаях, когда прогибы фибробетонных элементов в основном зависят от изгибных деформаций, значения прогибов определяют по жесткостным характеристикам согласно 6.2.21 и 6.2.30.

6.2.21 Для изгибаемых элементов постоянного по длине элемента сечения, не имеющих трещин, прогибы определяют по общим правилам строительной механики с использованием жесткости поперечных сечений, определяемой по формуле (6.117).

Определение кривизны фибробетонных элементов

6.2.22 Кривизну изгибаемых, внецентренно сжатых и внецентренно растянутых элементов для вычисления их прогибов определяют:

а) для элементов или участков элемента, где в растянутой зоне не образуются нормальные к продольной оси трещины, согласно 6.2.23 и 6.2.25;

б) для элементов или участков элемента, где в растянутой зоне имеются трещины, согласно 6.2.23, 6.2.24 и 6.2.26.

Элементы или участки элементов рассматривают без трещин, если трещины не образуются [т. е. условие (6.90) не выполняется] при действии полной нагрузки, включающей постоянную, временную длительную и кратковременную нагрузки.

Кривизну фибробетонных элементов с трещинами и без трещин можно также определять на основе деформационной модели согласно 6.2.31.

6.2.23 Полную кривизну изгибаемых, внецентренно сжатых и внецентренно растянутых элементов определяют по формулам:

- для участков без трещин в растянутой зоне:

$$\frac{1}{r}=\left(\frac{1}{r}\right)_1+\left(\frac{1}{r}\right)_2; \qquad (6.114)$$

- для участков с трещинами в растянутой зоне:

$$\frac{1}{r}=\left(\frac{1}{r}\right)_1-\left(\frac{1}{r}\right)_2+\left(\frac{1}{r}\right)_3. \qquad (6.115)$$

В формуле (6.114):

$\left(\frac{1}{r}\right)_1, \left(\frac{1}{r}\right)_2$ – кривизны соответственно от непродолжительного действия кратковременных нагрузок и от продолжительного действия постоянных и временных длительных нагрузок.

В формуле (6.115):

$\left(\frac{1}{r}\right)_1$ – кривизна от непродолжительного действия всей нагрузки, на которую производят расчет по деформациям;

$\left(\frac{1}{r}\right)_2$ – кривизна от непродолжительного действия постоянных и временных длительных нагрузок;

$\left(\frac{1}{r}\right)_3$ – кривизна от продолжительного действия постоянных и временных длительных нагрузок.

Кривизны $\left(\frac{1}{r}\right)_1$, $\left(\frac{1}{r}\right)_2$ и $\left(\frac{1}{r}\right)_3$ определяют согласно указаниям 6.2.24.

6.2.24 Кривизну фибробетонных элементов $\frac{1}{r}$ от действия соответствующих нагрузок (6.2.23) определяют по формуле:

$$\frac{1}{r}=\frac{M}{D}, \qquad (6.116)$$

где M – изгибающий момент от внешней нагрузки (с учетом момента от продольной силы N) относительно оси, нормальной плоскости действия изгибающего момента и проходящей через центр тяжести приведенного поперечного сечения элемента;

D – изгибная жесткость приведенного поперечного сечения элемента, определяемая по формуле:

$$D = E_{fb1} \cdot I_{red}, \qquad (6.117)$$

здесь E_{fb1} – модуль деформации сжатого фибробетона, определяемый в зависимости от продолжительности действия нагрузки и с учетом наличия или отсутствия трещин;

I_{red} – момент инерции приведенного поперечного сечения относительно его центра тяжести, определяемый с учетом наличия или отсутствия трещин.

Значения модуля деформации фибробетона E_{b1} и момента инерции приведенного сечения I_{red} для элементов без трещин в растянутой зоне и с трещинами определяют по указаниям 6.2.25 и 6.2.26 соответственно.

Жесткость фибробетонного элемента на участке без трещин в растянутой зоне

6.2.25 Жесткость фибробетонного элемента D на участке без трещин определяют по формуле (6.117).

Момент инерции I_{red} приведенного поперечного сечения элемента относительно его центра тяжести определяют как для сплошного тела по общим правилам сопротивления упругих элементов с учетом всей площади сечения фибробетона и площадей сечения арматуры с коэффициентом приведения арматуры к фибробетону α:

$$I_{red} = I + I_s \cdot \alpha + I'_s \cdot \alpha , \qquad (6.118)$$

где I – момент инерции фибробетонного сечения относительно центра тяжести приведенного поперечного сечения элемента;

I_s, I'_s – моменты инерции площадей сечения соответственно растянутой и сжатой арматуры относительно центра тяжести приведенного поперечного сечения элемента;

α – коэффициент приведения арматуры к фибробетону:

$$\alpha = \frac{E_s}{E_{fb1}} . \qquad (6.119)$$

Значение I определяют по общим правилам расчета геометрических характеристик сечений упругих элементов.

Допускается определять момент инерции I_{red} без учета арматуры.

Значения модуля деформации фибробетона в формулах (6.117), (6.119) принимают равными:

- при непродолжительном действии нагрузки:

$$E_{fb1} = 0{,}85 \cdot E_{fb} , \qquad (6.120)$$

- при продолжительном действии нагрузки:

$$E_{fb1} = E_{fb\tau} = \frac{E_{fb}}{1+\varphi_{b,cr}} , \qquad (6.121)$$

где $\varphi_{b,cr}$ – принимают по СП 63.13330.

Жесткость фибробетонного элемента на участке с трещинами в растянутой зоне.

6.2.26 Жесткость фибробетонного элемента на участках с трещинами в растянутой зоне определяют с учетом следующих положений:

- сечения после деформирования остаются плоскими;
- напряжения в фибробетоне сжатой зоны определяют как для упругого тела;
- напряжения в фибробетоне растянутой зоны в сечении с нормальной трещиной определяют с учетом нелинейных свойств;

- работу растянутого фибробетона на участке между смежными нормальными трещинами учитывают посредством коэффициента ψ_s.

Жесткость фибробетонного элемента D на участках с трещинами определяют по формуле (6.117) и принимают не более жесткости без трещин.

Значение модуля деформации сжатого фибробетона E_{b1} принимают равным значению приведенного модуля деформации $E_{fb,red}$, определяемого по формуле:

$$E_{b1} = E_{fb,red} = \frac{R_{fb,ser}}{\varepsilon_{fb1,red}}, \qquad (6.122)$$

в которой значения относительных деформаций $\varepsilon_{b1,red}$ принимают равными:

- при непродолжительном действии нагрузки $\varepsilon_{b1,red} = 0{,}0015$;
- при продолжительном действии нагрузки – по СП 63.13330 (таблица 30).

Значение модуля деформации растянутого фибробетона E_{fbt1} принимают равным значению приведенного модуля деформации $E_{fbt,red}$, определяемого по формуле:

$$E_{fbt1} = E_{fbt,red} = \frac{k \cdot R_{fbt,ser}}{\varepsilon_{fbt,red}}, \qquad (6.123)$$

где $\varepsilon_{fbt1,ult}$ – относительные деформации фибробетона при растяжении, принимаемые равными (см. рисунок 1):

0,02 – при $\frac{R_{fbt3}}{R_{fbt}} < 1$;

0,01 – при $\frac{R_{fbt3}}{R_{fbt}} \geq 1$.

Момент инерции приведенного поперечного сечения элемента I_{red} относительно его центра тяжести определяют с учетом:

- площади сечения фибробетона сжатой зоны;
- площади сечения фибробетона растянутой зоны с условным коэффициентом приведения к фибробетону сжатой зоны α_{fbt} ;
- площади сечения сжатой арматуры с коэффициентом приведения арматуры к фибробетону сжатой зоны α_{s1};
- площади растянутой арматуры с коэффициентом приведения арматуры к фибробетону сжатой зоны α_{s2}.

$$I_{red} = I_{fb} + I_{fbt} \cdot \alpha_{fbt} + I_s \cdot \alpha_{s2} + I_s^{/} \cdot \alpha_{s1}, \qquad (6.124)$$

где $I_{fb}, I_{fbt}, I_s, I_s'$ – моменты инерции площадей сечения соответственно сжатой и растянутой зоны фибробетона, растянутой и сжатой арматуры относительно центра тяжести приведенного поперечного сечения.

Значения I_{fbt}, I_s, I_s' определяют по общим правилам сопротивления материалов, принимая расстояние от наиболее сжатого волокна бетона до центра тяжести приведенного поперечного сечения без учета бетона растянутой зоны (рисунок 19); для изгибаемых элементов:

$$y_{cm} = x_m, \qquad (6.125)$$

где x_m – средняя высота сжатой зоны фибробетона, учитывающая влияние работы растянутого фибробетона между трещинами и определяемая согласно 6.2.27 (см. рисунок 19).

Значения I_{fb} и y_{cm} определяют по общим правилам расчета геометрических характеристик сечений упругих элементов.

Значения коэффициентов приведения фибробетона растянутой зоны α_{fbt} и арматуры к фибробетону α_{s1} и α_{s2} определяют по 6.2.29.

6.2.27 Для изгибаемых элементов положение нейтральной оси (средняя высота сжатой зоны фибробетона) определяют из уравнения:

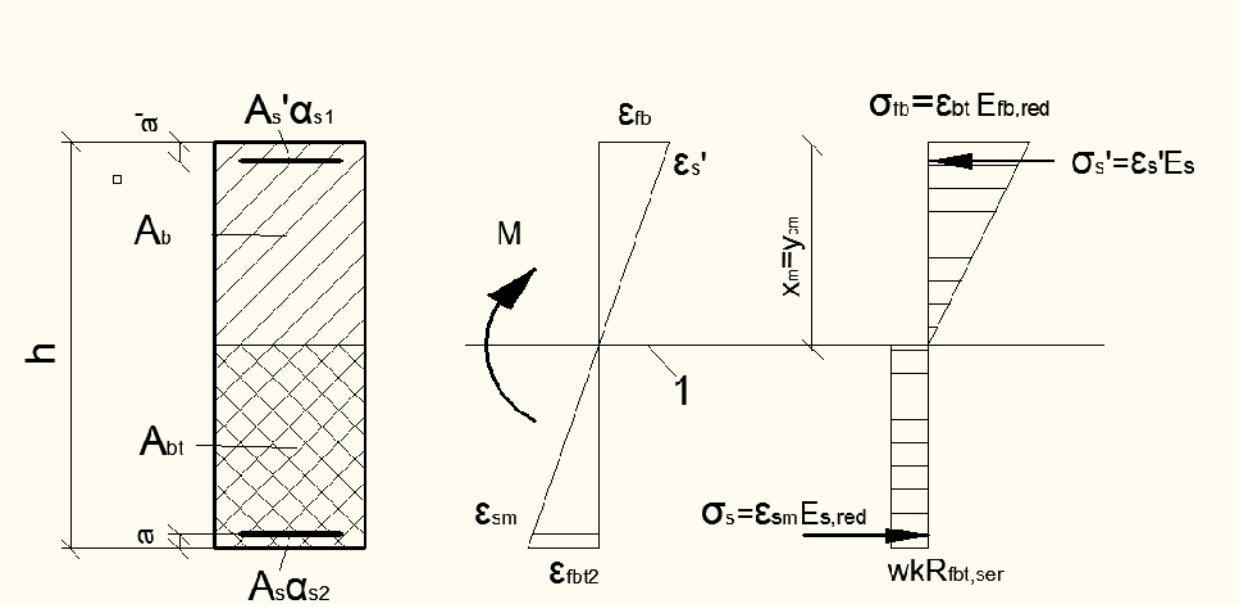
$$S_{fb0} = \alpha_{fbt} \cdot S_{fbt0} + \alpha_{s2} \cdot S_{s0} - \alpha_{s1} \cdot S'_{s0}, \qquad (6.126)$$

где S_{fb0}, S_{fbt0}, S_{s0} и S'_{s0} – статические моменты соответственно сжатой и растянутой зоны фибробетона, растянутой и сжатой арматуры относительно нейтральной оси.

Для прямоугольных сечений только с растянутой арматурой высоту сжатой зоны определяют по формуле:

$$x_m = \frac{h_0}{1-\alpha_{fbt}} \cdot \left(\sqrt{((\mu_s \cdot \alpha_{s2} + \mu'_s \cdot \alpha_{s1} + \alpha_{fbt})^2 + (1-\alpha_{fbt}) \cdot (2\mu_s \cdot \alpha_{s2} + 2\mu'_s \cdot \alpha_{s1} \cdot \frac{a'}{h_0} + \alpha_{fbt}))} - (\mu_s \cdot \alpha_{s2} + \mu'_s \cdot \alpha_{s1} + \alpha_{fbt}) \right) \qquad (6.127)$$

где $\mu_s = \frac{A_s}{b \cdot h_0}$; $\mu'_s = \frac{A'_s}{bh_0}$.



1 – уровень центра тяжести поперечного сечения

Рисунок 19 **– Приведенное поперечное сечение (а) и схема напряженно-деформированного состояния элемента с трещинами (б) для расчета его по деформациям при действии изгибающего момента**

Для внецентренно сжатых и внецентренно растянутых элементов положение нейтральной оси (высоту сжатой зоны) определяют из уравнения:

$$y_N = \frac{I_{fb0} + \alpha_{fbt} \cdot I_{fbt0} + \alpha_{s2} \cdot I_{s0} + \alpha_{s1} \cdot I'_{s0}}{S_{fb0} + \alpha_{fbt} \cdot S_{fbt0} + \alpha_{s2} \cdot S_{s0} + \alpha_{s1} \cdot S'_{s0}}, \qquad (6.128)$$

где y_N – расстояние от нейтральной оси до точки приложения продольной силы N, отстоящей от центра тяжести полного сечения (без учета трещин) на расстоянии $e_0 = \frac{M}{N}$;

$I_{fb0}, I_{fbt0}, I_{s0}, I'_{s0}, S_{fb0}, S_{fbt0}, S_{s0}, S'_{s0}$ – моменты инерции и статические моменты соответственно сжатой и растянутой зон фибробетона, растянутой и сжатой арматуры относительно нейтральной оси.

Допускается для элементов прямоугольного сечения высоту сжатой зоны при действии изгибающих моментов M и продольной силы N определять по формуле:

$$x_m = x_M \pm \frac{I_{red} \cdot N}{A_{red} \cdot M}, \qquad (6.129)$$

где x_M – высота сжатой зоны изгибаемого элемента, определяемая по формулам (6.126) – (6.127);

I_{red}, A_{red} – момент инерции и площадь приведенного поперечного сечения, определяемые для полного сечения (без учета трещин).

Значения геометрических характеристик сечения элемента определяют по общим правилам расчета сечения упругих элементов.

В формуле (6.129) знак «плюс» принимают при сжимающей, а знак «минус» при растягивающей продольной силе.

6.2.28 Жесткость изгибаемых фибробетонных элементов допускается определять по формуле:

$$D = E_{s,red} A_s z (h_0 - x_m), \qquad (6.130)$$

где z – расстояние от центра тяжести растянутой арматуры до точки приложения равнодействующей усилий в сжатой зоне.

Для элементов прямоугольного сечения при отсутствии (или без учета) сжатой арматуры значение z определяют по формуле:

$$z = h_0 - \frac{1}{3} x_m. \qquad (6.131)$$

Для элементов прямоугольного, таврового (с полкой в сжатой зоне) и двутаврового поперечных сечений значение z допускается принимать равным $0,8h_0$.

6.2.29 Значение условного коэффициента приведения фибробетона растянутой зоны сечения к фибробетону сжатой зоны принимают с учетом характера его деформирования при растяжении равным:

$$\alpha_{fbt} = \frac{E_{fbt,red}}{E_{fb,red}}. \qquad (6.132)$$

Значения коэффициентов приведения арматуры к фибробетону принимают равными:

- для сжатой арматуры

$$\alpha_{s1} = \frac{E_s}{E_{fb,red}}; \qquad (6.133)$$

- для растянутой арматуры

$$\alpha_{s2} = \frac{E_{s,red}}{E_{fb,red}}, \qquad (6.134)$$

где $E_{fb,red}$ и $E_{fbt,red}$ – определяют по указаниям 6.2.26;

$E_{s,red}$ – приведенный модуль деформации растянутой арматуры, определяемый с учетом влияния работы растянутого фибробетона между трещинами по формуле:

$$E_{s,red} = \frac{E_s}{\psi_s}. \qquad (6.135)$$

Значения коэффициента ψ_s определяют по формуле (6.112).

Допускается принимать ψ_s=1 и, следовательно, $\alpha_{s2} = \alpha_{s1}$. При этом, если условие (6.113) не удовлетворяется, расчет производят с учетом коэффициента ψ_s, определяемого по формуле (6.112).

6.2.30 Прогибы фибробетонных элементов можно определять по общим правилам строительной механики с использованием вместо кривизны $\left(\frac{1}{r}\right)$ непосредственно изгибных жесткостных характеристик *D* путем замены упругих изгибных характеристик *EI* в расчетных зависимостях на указанные характеристики *D*, вычисляемые по формулам, приведенным в 6.2.24 и 6.2.28.

При совместном действии кратковременной и длительной нагрузок полный прогиб элементов без трещин и с трещинами в растянутой зоне определяют путем суммирования прогибов от соответствующих нагрузок по аналогии с суммированием кривизны по 6.2.23, принимая жесткостные характеристики *D* в зависимости от указанной в этом пункте принятой продолжительности действия рассматриваемой нагрузки.

Допускается при определении жесткостных характеристик *D* элементов с трещинами в растянутой зоне принимать коэффициент ψ_s=1. В этом случае при совместном действии кратковременной и длительной нагрузок полный прогиб изгибаемых элементов с трещинами определяют путем суммирования прогибов от непродолжительного действия кратковременной нагрузки и от продолжительного действия длительной нагрузки с учетом соответствующих значений жесткостных характеристик *D*, т. е. подобно тому, как это принято для элементов без трещин.

Определение кривизны фибробетонных элементов на основе нелинейной деформационной модели

6.2.31 Полную кривизну фибробетонных элементов на участках без трещин в растянутой зоне сечения определяют по формуле (6.114), а на участках с трещинами в растянутой зоне сечения – по формуле (6.115).

Значения кривизн, входящих в формулы (6.114) и (6.115), определяют из решения системы уравнений (6.34) – (6.38). При этом для элементов с нормальными трещинами в растянутой зоне напряжение в арматуре, пересекающей трещины, определяют по формуле:

$$\sigma_{sj} = \frac{E_{sj} \cdot \nu_{sj} \cdot \varepsilon_{sj}}{\psi_{sj}}, \qquad (6.136)$$

где

$$\psi_{sj} = 1 - \frac{1}{1 + 0{,}8\frac{\varepsilon_{sj,crc}}{\varepsilon_{sj}}}, \qquad (6.137)$$

здесь $\varepsilon_{sj,crc}$ – относительная деформация растянутой арматуры в сечении с трещиной сразу после образования нормальных трещин;

ε_{sj} – усредненная относительная деформация растянутой арматуры, пересекающей трещины, в рассматриваемой стадии расчета.

При определении кривизн от непродолжительного действия нагрузки в расчете используют диаграммы кратковременного деформирования сжатого и растянутого фибробетона, а при определении кривизн от продолжительного действия нагрузки – диаграммы длительного деформирования фибробетона с расчетными характеристиками для предельных состояний второй группы.

Для частных случаев действия внешней нагрузки (изгиб в двух плоскостях, изгиб в плоскости оси симметрии поперечного сечения элемента и т. п.) кривизны, входящие в формулы (6.114) и (6.115), определяют из решения систем уравнений, указанных в 6.1.18 – 6.1.21.

7 Предварительно напряженные фибробетонные конструкции

7.1 Предварительные напряжения арматуры

7.1.1 Предварительные напряжения арматуры σ_{sp} принимают не более $0,9R_{s,n}$ для горячекатаной и термомеханически упрочненной арматуры и не более $0,8R_{s,n}$ для холоднодеформированной арматуры и арматурных канатов.

7.1.2 При расчете предварительно напряженных конструкций следует учитывать снижение предварительных напряжений вследствие потерь предварительного напряжения – до передачи усилий натяжения на фибробетон (первые потери) и после передачи усилия натяжения на фибробетон (вторые потери).

При натяжении арматуры на упоры следует учитывать:

- первые потери – от релаксации предварительных напряжений в арматуре, температурного перепада при термической обработке конструкций, деформации анкеров и деформации формы (упоров);
- вторые потери – от усадки и ползучести фибробетона.

При натяжении арматуры на фибробетон следует учитывать:

- первые потери – от деформации анкеров, трения арматуры о стенки каналов или поверхность конструкции;
- вторые потери – от релаксации предварительных напряжений в арматуре, усадки и ползучести фибробетона.

7.1.3 Потери от релаксации напряжений арматуры $\Delta\sigma_{sp1}$ определяют по формулам:

- для арматуры классов А600 – А1000 при способе натяжения:

механическом – $\Delta\sigma_{sp1} = 0,1\sigma_{sp} - 20$; (7.1)

электротермическом – $\Delta\sigma_{sp1} = 0,03\sigma_{sp}$; (7.2)

- для арматуры классов B_p1200–B_p1500, К1400, К1500, К1600 при способе натяжения:

механическом – $\Delta\sigma_{sp1} = (0,22\dfrac{\sigma_{sp}}{R_{s,n}} - 0,1)\cdot\sigma_{sp}$; (7.3)

электротермическом – $\Delta\sigma_{sp1} = 0,05\sigma_{sp}$. (7.4)

Здесь σ_{sp} принимается без потерь в МПа.

При отрицательных значениях $\Delta\sigma_{sp1}$ принимают $\Delta\sigma_{sp1} = 0$.

При наличии более точных данных о релаксации арматуры допускается принимать иные значения потерь от релаксации.

7.1.4 Потери $\Delta\sigma_{sp2}$ от температурного перепада Δt (°С), определяемого как разность температур натянутой арматуры в зоне нагрева и устройства, воспринимающего усилия натяжения при нагреве фибробетона, принимают равными:

$$\Delta\sigma_{sp2} = 1,25\Delta t . \quad (7.5)$$

При отсутствии точных данных по температурному перепаду допускается принимать Δt = 65 °С.

При наличии более точных данных о температурной обработке конструкции допускается принимать иные значения потерь от температурного перепада.

7.1.5 Потери от деформации стальной формы (упоров) $\Delta\sigma_{sp3}$ при неодновременном натяжении арматуры на форму определяют по формуле:

$$\Delta\sigma_{sp3} = \frac{n-1}{2n} \cdot \frac{\Delta l}{l} E_s \ , \qquad (7.6)$$

где n – число стержней (групп стержней), натягиваемых неодновременно;

Δl – сближение упоров по линии действия усилия натяжения арматуры, определяемое из расчета деформации формы;

l – расстояние между наружными гранями упоров.

При отсутствии данных о конструкции формы и технологии изготовления допускается принимать $\Delta\sigma_{sp3}$=30 МПа.

При электротермическом способе натяжения арматуры потери от деформации формы не учитываются.

7.1.6 Потери от деформации анкеров натяжных устройств $\Delta\sigma_{sp4}$ при натяжении арматуры на упоры определяют по формуле:

$$\Delta\sigma_{sp4} = \frac{\Delta l}{l} E_s \ , \qquad (7.7)$$

где Δl – обжатие анкеров или смещение стержня в зажимах анкеров;

l – расстояние между наружными гранями упоров.

При отсутствии данных допускается принимать Δl = 2 мм.

При электротермическом способе натяжения арматуры потери от деформации анкеров не учитывают.

7.1.7 При натяжении арматуры на фибробетон потери от деформации анкеров натяжных устройств $\Delta\sigma_{sp4}$ определяют по формуле (7.7), в которой принимают Δl = 2 мм, а потери от трения о стенки каналов или поверхность конструкции определяют по формуле:

$$\Delta\sigma_{sp7} = (1 - \frac{1}{e^{\omega x + \delta\theta}})\sigma_{sp} \ , \qquad (7.8)$$

где e – основание натуральных логарифмов;

ω, δ – коэффициенты, определяемые по таблице 5;

x – длина участка от натяжного устройства до расчетного сечения, м;

θ – суммарный угол поворота оси арматуры, рад;

σ_{sp} – принимается без потерь.

Т а б л и ц а 5

Канал или поверхность	Коэффициенты для определения потерь от трения арматуры		
	ω	δ, при арматуре в виде	
		пучков, канатов	стержней периодического профиля
1 Канал:			
- с металлической поверхностью	0,0030	0,35	0,40
- с фибробетонной поверхностью, образованный жестким каналообразователем	0	0,55	0,65
- с фибробетонной поверхностью,			

Канал или поверхность	Коэффициенты для определения потерь от трения арматуры		
	ω	δ, при арматуре в виде	
		пучков, канатов	стержней периодического профиля
образованный гибким каналообразователем	0,0015	0,55	0,65
2 Фибробетонная поверхность	0	0,55	0,65

7.1.8 Потери от усадки фибробетона $\Delta\sigma_{sp5}$ при натяжении арматуры на упоры определяют по формуле:

$$\Delta\sigma_{sp5} = \varepsilon_{fb,sh} \cdot E_s, \tag{7.9}$$

где $\varepsilon_{fb,sh}$ – деформации усадки фибробетона, значения которых можно приближенно принимать в зависимости от класса бетона-матрицы равными:

0,0002 – для бетона-матрицы классов В35 и ниже;

0,00025 – для бетона-матрицы класса В40;

0,0003 – для бетона-матрицы классов В45 и выше.

Для фибробетона, подвергнутого тепловой обработке при атмосферном давлении, потери от усадки фибробетона $\Delta\sigma_{sp5}$ вычисляют по формуле (7.9) с умножением полученного результата на коэффициент, равный 0,85.

Потери от усадки фибробетона $\Delta\sigma_{sp5}$ при натяжении арматуры на фибробетон определяют по формуле (7.9) с умножением полученного результата независимо от условий твердения фибробетона на коэффициент, равный 0,75.

Допускается потери от усадки фибробетона определять более точными методами.

7.1.9 Потери от ползучести фибробетона $\Delta\sigma_{sp6}$ определяют по формуле:

$$\Delta\sigma_{sp6} = \frac{0{,}8 \cdot \alpha \cdot \varphi_{b,cr} \cdot \sigma_{fbpj}}{1 + \alpha \cdot \mu_{spj}\left(1 + \frac{y_{sj}^2 \cdot A_{red}}{I_{red}}\right) \cdot \left(1 + 0{,}8 \cdot \varphi_{b,cr}\right)}, \tag{7.10}$$

где $\varphi_{b,cr}$ – коэффициент ползучести бетона-матрицы, определяемый согласно 6.1.16;

σ_{fbpj} – напряжения в фибробетоне на уровне центра тяжести рассматриваемой j-й группы стержней напрягаемой арматуры;

y_{sj} – расстояние между центрами тяжести сечения рассматриваемой группы стержней напрягаемой арматуры и приведенного поперечного сечения элемента;

A_{red}, I_{red} – площадь приведенного сечения элемента и ее момент инерции относительно центра тяжести приведенного сечения;

μ_{spj} – коэффициент армирования, равный A_{spj}/A, где A и A_{spj} – площади поперечного сечения элемента и рассматриваемой группы стержней напрягаемой арматуры соответственно.

Для фибробетона, подвергнутого тепловой обработке, потери вычисляют по формуле (7.9) с умножением полученного результата на коэффициент, равный 0,85.

Допускается потери от ползучести фибробетона определять более точными методами, учитывающими влияние фибрового армирования.

Напряжения σ_{fbpj} определяют по правилам расчета упругих материалов, принимая приведенное сечение элемента, включающее площадь сечения фибробетона и площадь

сечения всей продольной арматуры (напрягаемой и ненапрягаемой) с коэффициентом приведения арматуры к фибробетону $\alpha = \frac{E_s}{E_{fb}}$, согласно 7.1.10.

При $\sigma_{fbpj} < 0$ принимается $\Delta\sigma_{sp6} = 0$ и $\Delta\sigma_{sp5} = 0$.

7.1.10 Полные значения первых потерь предварительного напряжения арматуры (по 7.1.3 – 7.1.6) определяют по формуле

$$\Delta\sigma_{sp(1)} = \sum_i \Delta\sigma_{spi}, \tag{7.11}$$

где i – номер потерь предварительного напряжения.

Усилие предварительного обжатия фибробетона с учетом первых потерь равно:

$$P_{(1)} = \sum_j (A_{spj} \cdot \sigma_{sp(1)j}), \tag{7.12}$$

где A_{spj} и $\sigma_{sp(1)j}$ – площадь сечения j-й группы стержней напрягаемой арматуры в сечении элемента и предварительное напряжение в группе с учетом первых потерь:

$$\sigma_{sp(1)j} = \sigma_{spj} - \Delta\sigma_{sp(1)j}, \tag{7.13}$$

здесь σ_{spj} – начальное предварительное напряжение рассматриваемой группы стержней арматуры.

Полные значения первых и вторых потерь предварительного напряжения арматуры (по 7.1.3 – 7.1.8) определяют по формуле:

$$\Delta\sigma_{sp(2)} = \sum_i \Delta\sigma_{spi}. \tag{7.14}$$

Усилие в напрягаемой арматуре с учетом полных потерь равно:

$$P_{(2)} = \sum_j (A_{spj} \cdot \sigma_{sp(2)j}), \tag{7.15}$$

где $\sigma_{sp(2)j} = \sigma_{spj} - \Delta\sigma_{sp(2)j}$.

При проектировании конструкций полные суммарные потери $\Delta\sigma_{sp(2)j}$ для арматуры, расположенной в растянутой при эксплуатации зоне сечения элемента (основной рабочей арматуры), следует принимать не менее 100 МПа.

При определении усилия предварительного обжатия фибробетона P с учетом полных потерь напряжений следует учитывать сжимающие напряжения в ненапрягаемой арматуре, численно равные сумме потерь от усадки и ползучести фибробетона на уровне этой арматуры.

При определении усилий обжатия с учетом ненапрягаемой арматуры на уровне ненапрягаемой арматуры, потери от ползучести на этом уровне принимают равными $\Delta\sigma_{spj6} \cdot \frac{\sigma_{fbs}}{\sigma_{fbp}}$, где $\Delta\sigma_{spj6}$ – потери от ползучести для стержней напрягаемой арматуры, ближайшей к рассматриваемой ненапрягаемой арматуре; σ_{fbs} и σ_{fbp} – напряжения в фибробетоне на уровне рассматриваемой ненапрягаемой и напрягаемой арматуры соответственно.

7.1.11 Предварительные напряжения в фибробетоне σ_{fbp} при передаче усилия предварительного обжатия $P_{(1)}$, определяемого с учетом первых потерь, не должны превышать:

- если напряжения уменьшаются или не изменяются при действии внешних нагрузок $-0{,}9 \cdot R_{fbp}$,

- если напряжения увеличиваются при действии внешних нагрузок $-0{,}7 \cdot R_{fbp}$.

Напряжения в фибробетоне σ_{bp} определяют по формуле:

$$\sigma_{fbp} = \frac{P_{(1)}}{A_{red}} \pm \frac{P_{(1)} \cdot e_{op} \cdot y \pm M \cdot y}{I_{red}}, \qquad (7.16)$$

где $P_{(1)}$ – усилие предварительного обжатия с учетом первых потерь;

M – изгибающий момент от внешней нагрузки, действующий в стадии обжатия (собственный вес элемента);

y – расстояние от центра тяжести сечения до рассматриваемого волокна;

e_{op} – эксцентриситет усилия $P_{(1)}$ относительно центра тяжести приведенного поперечного сечения элемента.

7.1.12 Длину зоны передачи предварительного напряжения на фибробетон для арматуры без дополнительных анкерующих устройств определяют по формуле:

$$l_p = \frac{\sigma_{sp} \cdot A_s}{R_{bond} \cdot u_s}, \qquad (7.17)$$

но не менее $10\,d_s$ и 200 мм, а для арматурных канатов - также не менее 300 мм.

В формуле (7.17):

σ_{sp} – предварительное напряжение в напрягаемой арматуре с учетом первых потерь;

R_{bond} – сопротивление сцепления напрягаемой арматуры с фибробетоном, отвечающее передаточной прочности фибробетона и определяемое согласно 8.3;

A_s, u_s – площадь и периметр стержня арматуры.

Передачу предварительного напряжения с арматуры на фибробетон рекомендуется осуществлять плавно.

7.2 Расчет элементов предварительно напряженных фибробетонных конструкций по предельным состояниям первой группы

Расчет предварительно напряженных фибробетонных элементов по прочности

Общие положения

7.2.1 Расчет предварительно напряженных элементов производят для стадии эксплуатации на действие изгибающих моментов и поперечных сил от внешних нагрузок и для стадии предварительного обжатия на действие усилий от предварительного натяжения арматуры и усилий от внешних нагрузок, действующих в стадии обжатия.

7.2.2 Расчет по прочности предварительно напряженных элементов при действии изгибающих моментов следует производить для сечений, нормальных к их продольной оси.

Расчет по прочности нормальных сечений в общем случае производят на основе нелинейной деформационной модели согласно 7.2.13 – 7.2.15.

Допускается расчет фибробетонных элементов прямоугольного, таврового и двутаврового сечений с арматурой, расположенной у перпендикулярных плоскости изгиба граней элемента, при действии усилий в плоскости симметрии нормальных сечений производить на основе предельных усилий согласно 7.2.7 – 7.2.12.

7.2.3 Для фибробетонных элементов, у которых предельное усилие по прочности оказывается меньше предельного усилия по образованию трещин, площадь сечения продольной растянутой арматуры должна быть увеличена по сравнению с требуемой из расчета по прочности не менее чем на 15 % или должна удовлетворять расчету по прочности на действие момента образования трещин.

7.2.4 Расчет преднапряженных элементов в стадии обжатия производят как при внецентренном сжатии усилием предварительного обжатия в предельном состоянии согласно 7.2.10 – 7.2.12.

7.2.5 Расчет предварительно напряженных элементов по прочности при действии поперечных сил (расчет по наклонным сечениям) и местном действии нагрузки (расчеты на смятие и продавливание) следует производить согласно указаниям 6.1.

7.2.6 При расчете предварительно напряженных элементов по прочности следует учитывать возможные отклонения предварительного напряжения, определяемого согласно 7.1.9, путем умножения значений σ_{spj} (или усилия обжатия P_j) для рассматриваемого j-го стержня или группы стержней напрягаемой арматуры на коэффициент γ_{sp}.

Значения коэффициента γ_{sp} принимают равными:

0,9 – при благоприятном влиянии предварительного напряжения;

1,1 – при неблагоприятном влиянии предварительного напряжения.

Расчет предварительно напряженных элементов на действие изгибающих моментов в стадии эксплуатации по предельным усилиям

7.2.7 Расчет по прочности нормальных сечений следует производить согласно указаниям подраздела 6.1 с учетом дополнительных указаний 7.2.8 – 7.2.9. При этом в формулах подраздела 6.1 обозначения площадей сечения A_s и A'_s следует относить как к напрягаемой, так и к ненапрягаемой арматуре.

Допускается принимать для растянутой арматуры с условным пределом текучести напряжения выше R_s, но не более 1,1 R_s в зависимости от соотношения ξ и ξ_R.

7.2.8 Значения относительной деформации арматуры растянутой зоны $\varepsilon_{s,el}$ при вычислении значения граничной высоты сжатой зоны фибробетона ξ_R следует определять по формулам:

- для арматуры с условным пределом текучести

$$\varepsilon_{s,el} = \frac{R_s + 400 - \sigma_{sp}}{E_s}, \qquad (7.18)$$

где σ_{sp} – предварительное напряжение в арматуре с учетом всех потерь и $\gamma_{sp} = 0,9$, в МПа;

- для ненапрягаемой арматуры с физическим пределом текучести

$$\varepsilon_{s,el} = \frac{R_s}{E_s}. \qquad (7.19)$$

7.2.9 Для напрягаемой арматуры, расположенной в сжатой зоне, расчетное сопротивление сжатию R_{sc} следует заменить напряжением σ_{sc}, равным:

$500 - \sigma'_{sp}$ – при учете коэффициента условий работы фибробетона $\gamma_{b1} = 0,9$ (см. 6.1.12);

$400 - \sigma'_{sp}$ – при $\gamma_{b1} = 1,0$.

Здесь значения σ'_{sp} приводят в МПа.

Значения σ'_{sp} определяют с коэффициентом $\gamma_{sp} = 1,1$.

Во всех случаях напряжение σ_{sc} принимают не более R_{sc}.

Расчет предварительно напряженных элементов в стадии предварительного обжатия

7.2.10 При расчете элемента в стадии предварительного обжатия усилие в напрягаемой арматуре вводится в расчет как внешняя продольная сила, равная:

$$N_p = (\sigma'_{sp} - 330)A'_{sp} + \sigma_{sp} \cdot A_{sp}, \quad (7.20)$$

где A'_{sp} и A_{sp} – площади сечения напрягаемой арматуры, расположенной соответственно в наиболее обжатой и в растянутой (менее обжатой) зонах сечения;

σ'_{sp} и σ_{sp} – предварительные напряжения с учетом первых потерь и коэффициента γ_{sp}=1,1 в арматуре с площадью сечения A'_{sp} и A_{sp}.

7.2.11 Расчет по прочности элементов прямоугольного сечения в стадии предварительного обжатия производят из условия:

$$N_p \cdot e_p \le R_{fb} \cdot b \cdot x \cdot (h_o - 0{,}5x) - k \cdot R_{fbt} \cdot b \cdot (h - x)(\frac{h - x}{2} - a) + R_{sc} \cdot A_s^{/}(h_0 - a^{/}), \quad (7.21)$$

где e_p – расстояние от точки приложения продольной силы N_p с учетом влияния изгибающего момента M от внешней нагрузки, действующей в стадии изготовления (собственная масса элемента), до центра тяжести сечения ненапрягаемой арматуры растянутой или наименее сжатой (при полностью сжатом сечении элемента) от этих усилий (см. рисунок 20), определяемое по формуле:

$$e_p = e_{0p} + 0{,}5h - a \pm \frac{M}{N_p}, \quad (7.22)$$

здесь e_{op} – расстояние от точки приложения силы N_p до центра тяжести сечения элемента;

R_{fb} – расчетное сопротивление фибробетона сжатию, принимаемое по СП 63.13330 по линейной интерполяции как для класса фибробетона по прочности на сжатие, численно равного передаточной прочности фибробетона R_{fbp};

R_{fbt} – расчетное сопротивление фибробетона растяжению при изгибе, принимаемое по линейной интерполяции по таблице 5.2 как для класса фибробетона по остаточной прочности на растяжение при изгибе, численно равного передаточной прочности фибробетона на растяжение при изгибе R_{fbtp};

R_{sc} – расчетное сопротивление ненапрягаемой арматуры сжатию, принимаемое в стадии предварительного обжатия не более 330 МПа;

A'_s – площадь сечения ненапрягаемой арматуры, расположенной в наиболее сжатой зоне сечения элемента.

Высоту сжатой зоны фибробетона определяют в зависимости от величины ξ_R, определяемой по формуле (6.1) с подстановкой в нее значения $\varepsilon_{s,el} = \frac{R_s}{E_s}$, где R_s – расчетное сопротивление растянутой ненапрягаемой арматуры A_s, и ε_{fb2} =0,003:

а) при $\xi = \frac{x}{h_0} \le \xi_R$ (см. рисунок 20) по формуле:

$$x = \frac{N_p + R_s \cdot A_s - R_{sc} \cdot A_s^{/} + k \cdot R_{fbt} \cdot b \cdot h}{(R_{fb} + k \cdot R_{fbt}) \cdot b}; \quad (7.23)$$

б) при $\xi = \frac{x}{h_0} > \xi_R$ по формуле:

$$x = \frac{N_p + R_s \cdot A_s \cdot \dfrac{1+\xi_R}{1-\xi_R} - R_{sc} \cdot A_s^{/} + k \cdot R_{fbt} \cdot b \cdot h}{(R_{fb} + k \cdot R_{fbt}) \cdot b + \dfrac{2R_s \cdot A_s}{h_o(1-\xi_R)}}. \qquad (7.24)$$

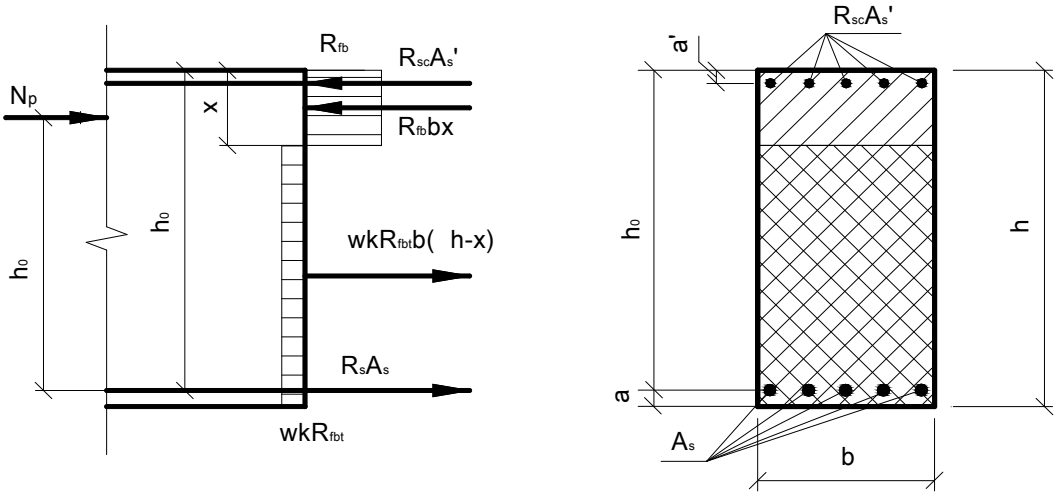


***Рисунок 20* – Схема усилий и эпюра напряжений в сечении, нормальном к продольной оси изгибаемого предварительно напряженного элемента при его расчете по прочности в стадии обжатия**

7.2.12 Расчет по прочности элементов таврового и двутаврового сечений в стадии предварительного обжатия производят в зависимости от положения границы сжатой зоны:

а) если граница сжатой зоны проходит в полке (см. рисунок 5, *а*), т. е. соблюдается условие:

$$N_p \le R_{fb} \cdot b_f^{/} \cdot h_f^{/} - k \cdot R_{fbt} \cdot [b_f \cdot h_f + b_w \cdot (h - h_f - h_f^{/})] + R_{sc} \cdot A_s^{/} - R_s \cdot A_s, \qquad (7.25)$$

расчет производят из условия:

$$N_p \cdot e_p \le R_{fb} \cdot b_f^{/} \cdot x \cdot (h_0 - 0{,}5x) - k \cdot R_{fbt} \cdot [b_f \cdot h_f \cdot (0{,}5h_f - a) + b_w \cdot h_w \cdot (0{,}5h_w + h_f - a) + b_f^{/} \cdot (h_f^{/} - x) \cdot (h_0 - 0{,}5 \cdot (h_f^{/} + x))] + R_{sc} \cdot A_s^{/} \cdot (h_0 - a^{/}), \qquad (7.26)$$

где

$$e_p = e_{op} + z_s \pm \frac{M}{N_p}; \qquad (7.27)$$

e_{op} – см. 7.2.11;

z_s – расстояние от центра тяжести сечения элемента до растянутой (наименее сжатой) ненапрягаемой арматуры.

Высоту сжатой зоны определяют:

при $\xi = \dfrac{x}{h_0} \le \xi_R$ (ξ_R – см. 7.2.11) – по формуле:

$$x = \frac{N_p + R_s \cdot A_s + k \cdot R_{fbt} \cdot (b_f^{/} \cdot h_f^{/} + b_w \cdot h_w + b_f \cdot h_f) - R_{sc} \cdot A_s^{/}}{b_w \cdot (k \cdot R_{fbt} + R_{fb})}; \qquad (7.28)$$

при $\xi = \dfrac{x}{h_0} > \xi_R$ – по формуле:

$$x = \frac{N_p + R_s \cdot A_s \cdot \frac{1+\xi_R}{1-\xi_R} - R_{sc} \cdot A_s^{/} + k \cdot R_{fbt} \cdot [b_f \cdot h_f + b_w \cdot (h - h_f - h_f^{/}) + b_f^{/} h_f^{/}]}{(R_{fb} + k \cdot R_{fbt}) \cdot b_f^{/} + \frac{2R_s \cdot A_s}{h_o(1-\xi_R)}}. \quad (7.29)$$

б) если граница сжатой зоны проходит в ребре (см. рисунок 5, *б*), т. е. условие (7.25) не соблюдается, расчет производят из условия:

$$N_p \cdot e_p \le R_{fb} \cdot [b_f^{/} \cdot h_f^{/} \cdot (h_0 - 0{,}5 \cdot h_f^{/}) + b_w \cdot (x - h_f^{/}) \cdot (h_0 - h_f - 0{,}5 \cdot x + 0{,}5 \cdot h_f^{/})] -$$
$$- k \cdot R_{fbt} \cdot [b_f \cdot h_f \cdot (0{,}5 h_f - a) + b_w \cdot (h_0 + h_f^{/} - x) \cdot (h_0 - 0{,}5 \cdot (x + h_w + h_f^{/}) +$$
$$+ b_f \cdot h_f \cdot (0{,}5 \cdot h_f - a)] + R_{sc} \cdot A_s^{/} \cdot (h_0 - a^{/}), \quad (7.30)$$

Высоту сжатой зоны определяют:

а) при $\xi = \frac{x}{h_0} \le \xi_R$ – по формуле:

$$x = \frac{N_p + R_s \cdot A_s + k \cdot R_{fbt} \cdot (b_w \cdot h_f^{/} + b_w \cdot h_w + b_f \cdot h_f) - R_{fb} \cdot h_f^{/} \cdot (b_f^{/} - b_w) - R_{sc} \cdot A_s^{/}}{b_w \cdot (k \cdot R_{fbt} + R_{fb})}; \quad (7.31)$$

б) при $\xi = \frac{x}{h_0} > \xi_R$ – по формуле:

$$x = \frac{N_p + R_s \cdot A_s \cdot \frac{1+\xi_R}{1-\xi_R} - R_{sc} \cdot A_s^{/} + k \cdot R_{fbt} \cdot [b_f \cdot h_f + b_w \cdot (h - h_f)]}{(R_{fb} + k \cdot R_{fbt}) \cdot b_w + \frac{2R_s \cdot A_s}{h_o(1-\xi_R)}}. \quad (7.32)$$

Расчет по прочности нормальных сечений на основе нелинейной деформационной модели

7.2.13 При расчете по прочности на основе нелинейной деформационной модели усилия и деформации в сечении, нормальном к продольной оси элемента, определяют с использованием основных положений, указанных в 6.1.20 – 6.1.22.

7.2.14 При расчете нормальных сечений по прочности (см. рисунок 21) в общем случае используют:

- уравнения равновесия внешних сил и внутренних усилий в нормальном сечении элемента:

$$M_x = \sum_i \sigma_{fbi} \cdot A_{bi} \cdot Z_{fbxi} + \sum_j \sigma_{sj} \cdot A_{sj} \cdot Z_{sxj} + \sum_i \sigma_{si} \cdot A_{si} \cdot Z_{sxi}; \quad (7.33)$$

$$M_y = \sum_i \sigma_{fbi} \cdot A_{bi} \cdot Z_{fbyi} + \sum_j \sigma_{sj} \cdot A_{sj} \cdot Z_{syj} + \sum \sigma_{si} \cdot A_{si} \cdot Z_{syi} \quad (7.34)$$

$$N = \sum_i \sigma_{fbi} \cdot A_{bi} + \sum_j \sigma_{sj} \cdot A_{sj} + \sum_i \sigma_{si}; \quad (7.35)$$

- уравнений, определяющих распределение деформаций от действия внешней нагрузки по сечению элемента:

$$\varepsilon_{bi} = \varepsilon_o + \frac{1}{r_x} \cdot Z_{fbxi} + \frac{1}{r_y} \cdot Z_{fbyi}; \quad (7.36)$$

$$\varepsilon_{sj} = \varepsilon_0 + \frac{1}{r_x} \cdot Z_{sxj} + \frac{1}{r_y} \cdot Z_{syj}\,; \tag{7.37}$$

$$\varepsilon_{si} = \varepsilon_0 + \frac{1}{r_x} \cdot Z_{sxi} + \frac{1}{r_y} \cdot Z_{syi}\,; \tag{7.38}$$

- зависимости, связывающие напряжения и относительные деформации фибробетона и арматуры:

- фибробетона

$$\sigma_{fbi} = E_{fb} \cdot \nu_{fbi} \cdot \varepsilon_{fbi}\,; \tag{7.39}$$

- ненапрягаемой арматуры

$$\sigma_{sj} = E_{sj} \cdot \nu_{sj} \cdot \varepsilon_{sj}\,; \tag{7.40}$$

- напрягаемой арматуры

$$\sigma_{si} = E_{si} \cdot \nu_{si}(\varepsilon_{si} + \varepsilon_{spi})\,. \tag{7.41}$$

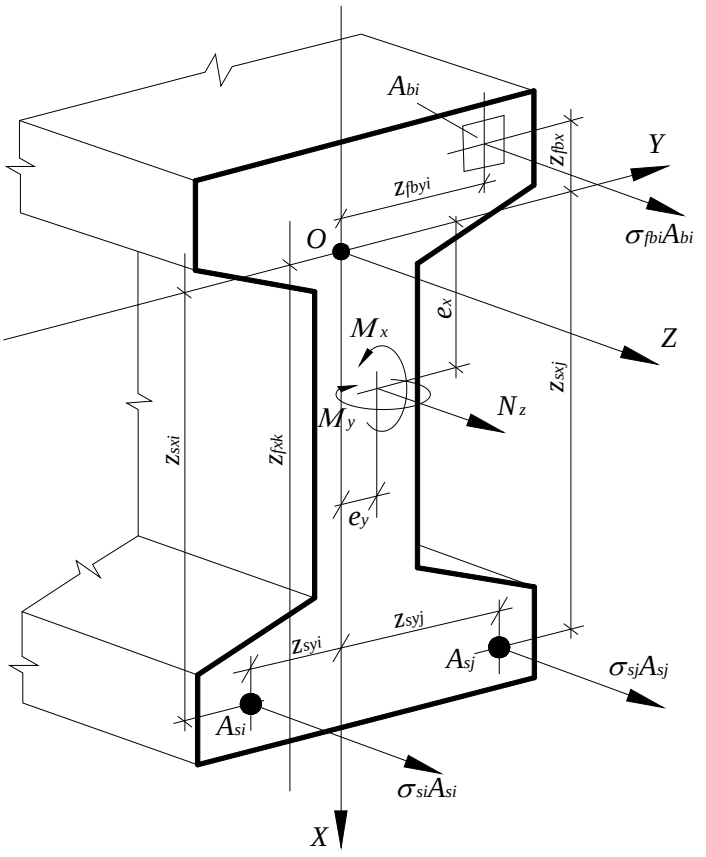


***Рисунок 21* – Расчетная схема нормального сечения фибробетонного элемента с предварительно напряженной арматурой**

В уравнениях (7.29) – (7.41):

A_{si}, Z_{sxi}, Z_{syi}, σ_{si} – площадь, координаты центра тяжести i-го стержня напрягаемой арматуры и напряжение в нем;

ε_{si} – относительная деформация i-го стержня напрягаемой арматуры от действия внешней нагрузки;

ε_{spi} – относительная деформация предварительного напряжения арматуры с учетом относительных деформаций потерь предварительного напряжения, отвечающих рассматриваемой расчетной стадии;

E_{si} – модуль упругости *i*-го стержня напрягаемой арматуры;

ν_{si} – коэффициент упругости *i*-го стержня напрягаемой арматуры.

Остальные параметры – см. 6.1.16.

Значения коэффициентов ν_{fbi} и ν_{sj} определяют по указаниям 6.1.16, а значения коэффициентов ν_{si} – по формуле:

$$\nu_{si} = \frac{\sigma_{si}}{E_{si} \cdot (\varepsilon_{si} + \varepsilon_{spi})}. \qquad (7.42)$$

7.2.15 Расчет нормальных сечений фибробетонных элементов по прочности производят из условий, приведенных в 6.1.17.

7.3 Расчет предварительно напряженных фибробетонных элементов по предельным состояниям второй группы

Общие положения

7.3.1 Расчеты по предельным состояниям второй группы включают:

- расчет по образованию трещин;
- расчет по раскрытию трещин;
- расчет по деформациям.

7.3.2 Расчет по образованию трещин производят, когда необходимо обеспечить отсутствие трещин, а также как вспомогательный при расчете по раскрытию трещин и по деформациям.

Требования по отсутствию трещин предъявляют к предварительно напряженным конструкциям, у которых при полностью растянутом сечении должна быть обеспечена непроницаемость (конструкции находящиеся под давлением жидкости или газов, испытывающие воздействие радиации и т. п.), к уникальным конструкциям, а также к конструкциям при воздействии сильно агрессивной среды.

7.3.3 При расчете по образованию трещин в целях их недопущения коэффициент надежности по нагрузке принимают $\gamma_f > 1{,}0$ (как при расчете по прочности). При расчете по раскрытию трещин и по деформациям (включая вспомогательный расчет по образованию трещин) принимают коэффициент надежности по нагрузке $\gamma_f = 1{,}0$.

7.3.4 Расчет изгибаемых предварительно напряженных элементов по предельным состояниям второй группы производят как при внецентренном сжатии на совместное действие усилий от внешней нагрузки M и продольной силы N_p, равной усилию предварительного обжатия P.

Расчет предварительно напряженных фибробетонных элементов по образованию и раскрытию трещин

7.3.5 Расчет предварительно напряженных изгибаемых элементов по раскрытию трещин производят исходя из общих положений, указанных в подразделе 6.2 и с учетом указаний 7.3.6 – 7.3.10.

Определение момента образования трещин, нормальных к продольной оси элемента

7.3.6 Изгибающий момент M_{crc} при образовании трещин в общем случае определяется по деформационной модели согласно 7.3.9. Допускается для простых сечений (прямоугольного и таврового сечений с арматурой, расположенной у верхней и

нижней граней сечения, с полкой в сжатой зоне) определять момент трещинообразования согласно 7.3.7.

7.3.7 Определение момента образования трещин производят с учетом неупругих деформаций растянутого фибробетона согласно 7.3.8.

Допускается момент образования трещин определять без учета неупругих деформаций растянутого фибробетона, принимая в формуле (7.43) $W_{pl}=W_{red}$. Если при этом условие (6.91) или (6.113) не удовлетворяется, то момент образования трещин следует определять с учетом неупругих деформаций растянутого фибробетона.

7.3.8 Момент образования трещин предварительно напряженных изгибаемых элементов с учетом неупругих деформаций растянутого фибробетона определяют по формуле:

$$M_{crc} = R_{fbt,ser} \cdot W_{pl} \pm P \cdot e_{яр}, \qquad (7.438)$$

где W_{pl} – момент сопротивления приведенного сечения для крайнего растянутого волокна, определяемый с учетом положений 6.2.10;

$e_{яр} = e_o + r$ – расстояние от точки приложения усилия предварительного обжатия P до ядровой точки, наиболее удаленной от растянутой зоны, трещинообразование которой проверяется;

e_{op} – то же, до центра тяжести приведенного сечения;

r – расстояние от центра тяжести приведенного сечения до ядровой точки:

$$r = \frac{W_{red}}{A_{red}}. \qquad (7.44)$$

В формуле (7.43) знак «плюс» принимают, когда направления вращения моментов $P \cdot e_{яр}$ и внешнего изгибающего момента M противоположны; «минус» – когда направления совпадают.

Значения W_{red} и A_{red} определяют согласно указаниям 6.2.

Для прямоугольных сечений и тавровых сечений с полкой, расположенной в сжатой зоне, значение W_{pl} при действии момента в плоскости оси симметрии допускается определять по формуле (6.95).

7.3.9 Определение момента образования трещин на основе нелинейной деформационной модели производят исходя из общих положений, приведенных в 7.2.13 – 7.2.15, при этом расчетные характеристики материалов принимают для предельных состояний второй группы.

Значение M_{crc} определяют из решения системы уравнений, представленных в 7.2.13 – 7.2.15, принимая относительную деформацию фибробетона $\varepsilon_{bt,\max}$ у растянутой грани элемента от действия внешней нагрузки, равной предельному значению относительной деформации фибробетона при растяжении $\varepsilon_{bt,ult}$, определяемому согласно указаниям 6.1.30.

Расчет ширины раскрытия трещин, нормальных к продольной оси элемента

7.3.10 Ширину раскрытия нормальных трещин определяют по формуле (6.102), в которой значение напряжений σ_s в растянутой арматуре изгибаемых предварительно напряженных элементов от внешней нагрузки определяют по формуле:

$$\sigma_s = \left[\frac{M_p (h_0 - y_c)}{I_{red}} - \frac{N_p}{A_{red}} \right] \cdot \alpha_{s1}, \qquad (7.45)$$

где I_{red}, A_{red}, y_c – момент инерции, площадь приведенного поперечного сечения элемента и расстояние от наиболее сжатого волокна до центра тяжести приведенного сечения, определяемые с учетом площади сечения только сжатой

зоны фибробетона, площадей сечения растянутой и сжатой арматуры согласно 6.2.25, принимая в соответствующих формулах значения коэффициента приведения арматуры к бетону $\alpha_{s2} = \alpha_{s1}$;

N_p – усилие предварительного обжатия (см. 7.3.4);

M_p – изгибающий момент от внешней нагрузки и усилия предварительного обжатия, определяемый по формуле:

$$M_p = M \pm N_p \cdot e_{op}, \tag{7.46}$$

здесь e_{op} – расстояние от точки приложения усилия предварительного обжатия N_p до центра тяжести приведенного сечения.

Знак «минус» в формуле (7.46) принимают, когда направления вращений моментов M и $N_p \cdot e_{op}$ не совпадают, и «плюс» – когда совпадают.

Допускается напряжение σ_s определять по формуле:

$$\sigma_s = \frac{M - N_p \cdot (z - e_{sp}) - k \cdot R_{fbt,ser} \cdot A_{bt}}{z_s \cdot A_s}, \tag{7.47}$$

где z – расстояние от центра тяжести арматуры, расположенной в растянутой зоне сечения, до точки приложения равнодействующей усилий в сжатой зоне элемента;

A_{bt} – площадь растянутой зоны сечения элемента;

e_{sp} – расстояние от центра тяжести той же арматуры до точки приложения усилия N_p.

Для элементов прямоугольного поперечного сечения при отсутствии (или без учета) сжатой арматуры значение z определяют по формуле:

$$z = h_0 - \frac{x_N}{3}, \tag{7.90}$$

где x_N – высота сжатой зоны, определяемая согласно 6.2.27 с учетом действия усилия предварительного обжатия N_p.

Напряжения σ_s, определяемые по формулам (7.45) и (7.47), не должны превышать ($R_{s,ser} - \sigma_{sp}$).

Расчет предварительно напряженных фибробетонных элементов по деформациям

7.3.11 Расчет предварительно напряженных элементов по деформациям производят согласно указаний 6.2.18–6.2.31 и с учетом дополнительных указаний 7.3.12–7.3.14.

7.3.12 Полную кривизну изгибаемых предварительно напряженных элементов для вычисления их прогибов определяют по указаниям 6.2.23, при этом значения кривизн $\left(\frac{1}{r}\right)_1$, $\left(\frac{1}{r}\right)_2$ и $\left(\frac{1}{r}\right)_3$ в формулах (6.114), (6.115) определяют по указаниям 7.3.13 с учетом усилия предварительного обжатия.

Допускается при определении кривизны учитывать влияние деформаций усадки и ползучести фибробетона в стадии предварительного обжатия.

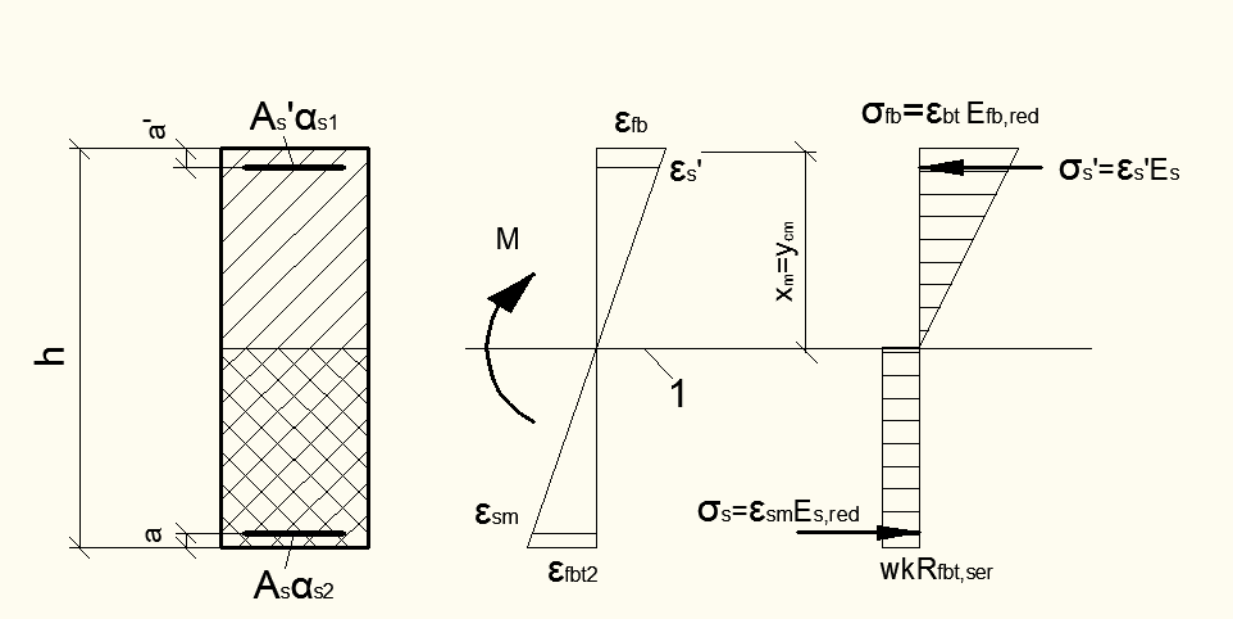
7.3.13 Кривизну изгибаемых предварительно напряженных элементов $\frac{1}{r}$ от действия соответствующих нагрузок определяют по формуле:

$$\frac{1}{r} = \frac{M - N_p \cdot e_{op}}{D}, \qquad (7.49)$$

где M – изгибающий момент от внешней нагрузки;

N_p и e_{op} – усилие предварительного обжатия и его эксцентриситет относительно центра тяжести приведенного поперечного сечения элемента;

D – изгибная жесткость приведенного поперечного сечения элемента, определяемая по указаниям подраздела 6.2 как для внецентренно сжатого усилием предварительного обжатия элемента с учетом изгибающего момента от внешней нагрузки (см. рисунок 22).



1 – уровень центра тяжести приведенного без учета растянутой зоны фибробетона поперечного сечения

***Рисунок 22* – Приведенное поперечное сечение (а) и схема напряженно-деформированного состояния изгибаемого предварительно напряженного элемента с трещинами (б) при его расчете по деформациям**

7.3.14 Кривизну изгибаемых предварительно напряженных элементов допускается определять по формуле:

$$\frac{1}{r} = \frac{M - N_p \cdot z_p}{E_{s,red} \cdot A_s \cdot z(h_0 - x_N)}, \qquad (7.50)$$

где z_p – расстояние от точки приложения усилия предварительного обжатия до точки приложения равнодействующей усилий в сжатой зоне;

z – расстояние от центра тяжести растянутой арматуры до точки приложения равнодействующей усилий в сжатой зоне;

x_N – высота сжатой зоны с учетом влияния предварительного обжатия.

Высоту сжатой зоны определяют как для изгибаемых элементов без преднапряжения согласно 6.2.27 с умножением значения μ_s на $1 + \frac{N_p}{M_p} \cdot z$.

Значения z_p и z допускается определять, принимая расстояние от точки приложения равнодействующей усилий в сжатой зоне до наиболее сжатого волокна сечения равным $0,3h_0$.

Определение кривизны предварительно напряженных элементов на основе нелинейной деформационной модели

7.3.15 Полную кривизну изгибаемых предварительно напряженных элементов на участках без трещин в растянутой зоне сечения определяют по формуле (6.114), а на участках с трещинами в растянутой зоне сечения – по формуле (6.115).

Значения кривизн, входящих в формулы (6.114) и (6.115), определяют из решения системы уравнений (7.40) – (7.48) с учетом указаний 7.2.13. При этом для элементов с нормальными трещинами в растянутой зоне напряжение в напрягаемой арматуре, пересекающей трещины, определяют по формуле:

$$\sigma_{si} = \left(\frac{E_{si} \cdot \varepsilon_{si}}{\psi_{si}} + E_{si} \cdot \varepsilon_{spi} \right) \cdot \nu_{si}, \qquad (7.51)$$

а в ненапрягаемой арматуре:

$$\sigma_{sj} = \frac{E_{sj} \cdot \varepsilon_{sj}}{\psi_{sj}}, \qquad (7.52)$$

где

$$\psi_{si(j)} = \frac{1}{1 + 0,8 \cdot \dfrac{\varepsilon_{si(j),crc}}{\varepsilon_{si(j)}}}, \qquad (7.53)$$

здесь $\varepsilon_{si(j),crc}$ – относительная деформация растянутой арматуры в сечении с трещиной от действия внешней нагрузки сразу после образования трещин;

$\varepsilon_{si(j)}$ – усредненные относительные деформации растянутой арматуры, пересекающей трещины, в рассматриваемой стадии;

ε_{spi} – относительная деформация предварительного напряжения арматуры.

При определении кривизны от непродолжительного действия нагрузки в расчете используют диаграммы кратковременного деформирования сжатого и растянутого фибробетона, а при определении кривизны от продолжительного действия нагрузки – диаграммы длительного деформирования фибробетона с расчетными характеристиками для предельных состояний второй группы.

8 КОНСТРУКТИВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ

8.1 Для обеспечения безопасности и эксплуатационной пригодности фибробетонных конструкций помимо требований к расчету следует также выполнять конструктивные требования к геометрическим размерам и армированию.

8.2 Геометрические размеры фибробетонных конструкций и их армирование стержневой арматурой должны отвечать требованиям СП 63.13330, установленным к геометрическим размерам и армированию бетонных и железобетонных конструкций, и дополнительному требованию, приведенному в 8.3.

8.3 Базовую (основную) длину анкеровки, необходимую для передачи усилия в арматуре с полным расчетным значением сопротивления R_s на фибробетон, определяют по формуле:

$$l_{0,an} = \frac{R_s \cdot A_s}{R_{bond} \cdot u_s}, \qquad (8.1)$$

где A_s и u_s – соответственно площадь поперечного сечения анкеруемого стержня арматуры и периметр его сечения, определяемые по номинальному диаметру стержня;

R_{bond} – расчетное сопротивление сцепления арматуры с бетоном, принимаемое равномерно распределенным по длине анкеровки и определяемое по формуле:

$$R_{bond} = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot R_{fbt}\,, \tag{8.2}$$

здесь R_{fbt} – расчетное сопротивление фибробетона осевому растяжению;

η_1 и η_2 – коэффициенты, учитывающие влияние вида поверхности и размера диаметра арматуры, принимаемые по указаниям СП 63.13330.

8.4 Размеры фибр и коэффициент фибрового армирования следует принимать такими, чтобы минимальная площадь поперечного сечения элемента или его части A_{min} отвечала условию:

$$A_{min} \geq \frac{4d_{f,red}}{\mu_{fv} k_{or}}. \tag{8.3}$$

8.5 Коэффициент фибрового армирования по объему рекомендуется принимать в пределах $0{,}005 \leq \mu_{fv} \leq 0{,}018$ для конструкций, работающих на растяжение, изгиб и сжатие. Допускается при наличии экономического обоснования принимать коэффициент фибрового армирования для конструкций подверженных ударным, истирающим, температурным воздействиям или при предъявлении к конструкциям повышенных требований к трещиностойкости в пределах $0{,}018 < \mu_{fv} \leq 0{,}020$.

8.6 Минимальные значения коэффициента фибрового армирования рекомендуется принимать, соблюдая следующее условие:

$$\mu_{min} = \frac{1{,}5CR_{bt}}{R_f k_{or}^2 \left(1 - \frac{30}{R_f} - \frac{l_{fan}}{l_f}\right)}, \tag{8.4}$$

где C – безразмерный коэффициент:

C = 1,0 – для элементов, работающих при осевом и внецентренном растяжении с малыми эксцентриситетами;

C = 0,6 – для изгибаемых элементов.

Приложение А

Основные буквенные обозначения

Усилия от внешних нагрузок и воздействий в поперечном сечении элемента

M – изгибающий момент;
M_p – изгибающий момент с учетом момента усилия предварительного обжатия относительно центра тяжести приведенного сечения;
N – продольная сила;
Q – поперечная сила;

Характеристики материалов

$R_{fb,n}$ – нормативное сопротивление фибробетона осевому сжатию;
R_{fb}, $R_{fb,ser}$ – расчетные сопротивления фибробетона осевому сжатию для предельных состояний соответственно первой и второй групп;
$R_{ft,n}$ – нормативное сопротивление фибробетона осевому растяжению;
R_{ft}, $R_{ft,ser}$ – расчетные сопротивления фибробетона осевому растяжению для предельных состояний соответственно первой и второй групп;
$R_{fbt,n}$ – нормативное остаточное сопротивление фибробетона растяжению при изгибе;
R_{ft}, $R_{ft,ser}$ – расчетные остаточное сопротивление фибробетона растяжению при изгибе для предельных состояний соответственно первой и второй групп;
$R_{fb,loc}$ – расчетное сопротивление фибробетона смятию;
R_{bond} – расчетное сопротивление сцепления арматуры с фибробетоном;
R_s, $R_{s,ser}$ – расчетные сопротивления арматуры растяжению для предельных состояний соответственно первой и второй групп;
R_{sw} – расчетное сопротивление поперечной арматуры растяжению;
R_{sc} – расчетное сопротивление арматуры сжатию для предельных состояний первой группы;
E_{fb} – начальный модуль упругости фибробетона при сжатии и растяжении;
$E_{fb,red}$ – приведенный модуль деформации сжатого фибробетона;
$E_{fbt,red}$ – приведенный модуль деформации растянутого фибробетона;
E_s – модуль упругости арматуры;
$E_{s,red}$ – приведенный модуль деформации арматуры, расположенной в растянутой зоне элемента с трещинами;
ε_{fbo}, ε_{fto} – предельные относительные деформации фибробетона соответственно при равномерном осевом сжатии и осевом растяжении;
ε_{so} – относительные деформации арматуры при напряжении, равном R_s;
$\varepsilon_{fb,sh}$ – относительные деформации усадки фибробетона;
$\varphi_{b,cr}$ – коэффициент ползучести фибробетона;
α – отношение соответствующих модулей упругости арматуры E_s и фибробетона E_{fb}.

Характеристики положения продольной арматуры в поперечном сечении элемента

S – обозначение продольной арматуры:
а) при наличии сжатой и растянутой от действия внешней нагрузки зон сечения – расположенной в растянутой зоне;
б) при полностью сжатом от действия внешней нагрузки сечении –

расположенной у менее сжатой грани сечения;

в) при полностью растянутом от действия внешней нагрузки сечении:

- для внецентренно растянутых элементов – расположенной у более растянутой грани сечения;
- для центрально-растянутых элементов – всей в поперечном сечении элемента;

S' – обозначение продольной арматуры:

а) при наличии сжатой и растянутой от действия внешней нагрузки зон сечения – расположенной в сжатой зоне;

б) при полностью сжатом от действия внешней нагрузки сечении – расположенной у более сжатой грани сечения;

в) при полностью растянутом от действия внешней нагрузки сечении внецентренно растянутых элементов – расположенной у менее растянутой грани сечения.

Геометрические характеристики

b – ширина прямоугольного сечения;
ширина ребра таврового и двутаврового сечений;

b_f, b'_f – ширина полки таврового и двутаврового сечений соответственно в растянутой и сжатой зонах;

h – высота прямоугольного, таврового и двутаврового сечений;

h_f, h'_f – высота полки таврового и двутаврового сечений соответственно в растянутой и сжатой зонах;

a, a' – расстояние от равнодействующей усилий в арматуре соответственно S и S' до ближайшей грани сечения;

h_0, h'_0 – рабочая высота сечения, равная соответственно $h - a$ и $h - a'$;

x – высота сжатой зоны фибробетона;

ξ – относительная высота сжатой зоны фибробетона, равная $\frac{x}{h_0}$;

s_w – расстояние между хомутами, измеренное по длине элемента;

e_0 – эксцентриситет продольной силы N относительно центра тяжести приведенного сечения, определяемый с учетом указаний 7.1.7 и 8.1.7;

e, e' – расстояния от точки приложения продольной силы N до равнодействующей усилий в арматуре соответственно S и S';

e_{op} – эксцентриситет усилия предварительного обжатия относительно центра тяжести приведенного сечения;

y_n – расстояние от нейтральной оси до точки приложения усилия предварительного обжатия с учетом изгибающего момента от внешней нагрузки;

e_p – расстояние от точки приложения усилия предварительного обжатия N_p с учетом изгибающего момента от внешней нагрузки до центра тяжести растянутой или наименее сжатой арматуры;

l – пролет элемента;

l_{an} – длина зоны анкеровки;

l_p – длина зоны передачи предварительного напряжения в арматуре на фибробетон;

l_0 – расчетная длина элемента, подвергающегося действию сжимающей продольной силы;

i – радиус инерции поперечного сечения элемента относительно центра тяжести сечения;

d_s , d_{sw} – номинальный диаметр стержней соответственно продольной и поперечной арматуры;

A_s,A'_s – площади сечения арматуры соответственно S и S';

A_{sw} – площадь сечения хомутов, расположенных в одной нормальной к продольной оси элемента плоскости, пересекающей наклонное сечение;

μ_s – коэффициент армирования, определяемый как отношение площади сечения арматуры S к площади поперечного сечения элемента $b \cdot h_0$ без учета свесов сжатых и растянутых полок;

μ_{fv} – коэффициент фибрового армирования по объему, определяемый относительное содержание объема фибр в единице объема фибробетона;

A – площадь всего фибробетона в поперечном сечении;

A_b – площадь сечения фибробетона сжатой зоны;

A_{bt} – площадь сечения фибробетона растянутой зоны;

A_{red} – площадь приведенного сечения элемента;

A_{loc} – площадь смятия фибробетона;

I – момент инерции сечения всего фибробетона относительно центра тяжести сечения элемента;

I_{red} – момент инерции приведенного сечения элемента относительно его центра тяжести;

W – момент сопротивления сечения элемента для крайнего растянутого волокна.

Характеристики предварительно напряженного элемента

P, N_p – усилие предварительного обжатия с учетом потерь предварительного напряжения в арматуре, соответствующих рассматриваемой стадии работы элемента;

$P_{(1)}$, $P_{(2)}$ – усилие в напрягаемой арматуре с учетом соответственно первых и всех потерь предварительного напряжения;

σ_{sp} – предварительное напряжение в напрягаемой арматуре с учетом потерь предварительного напряжения в арматуре, соответствующих рассматриваемой стадии работы элемента;

$\Delta\sigma_{sp}$ – потери предварительного напряжения в арматуре;

σ_{bp} – сжимающие напряжения в фибробетоне в стадии предварительного обжатия с учетом потерь предварительного напряжения в арматуре.

Приложение Б

Определение остаточной прочности фибробетона на растяжение при изгибе

Б.1 Метод испытания

Остаточная прочность фибробетона на растяжение при изгибе определяется по результатам испытаний контрольных образцов-балок с надрезом на действие сосредоточенной нагрузки (см. рисунок Б.1).

Б.2 Приборы

Б.2.1 Циркулярная пила с лезвием из корунда или алмаза с регулируемой глубиной и направлением резки под углом 90° для выполнения надрезов контрольных образцов.

Б.2.2 Штангенциркуль для определения размеров испытательных образцов с точностью не менее 0,1 мм.

Б.2.3 Линейка для определения размеров испытательных образцов с точностью до 1 мм.

Б.2.4 Испытательная машина по ГОСТ 28840, обеспечивающая регулируемую скорость перемещения активной траверсы в диапазоне и измерение нагрузки и перемещения с погрешностью не более 0,5 %. Минимальное регистрируемое значение для нагрузки должно быть не более 100 Н.

Б.2.5 Датчики измерения линейного перемещения (прогибов f или перемещений внешних граней надреза a_{fi}) с точностью до 0,01 мм.

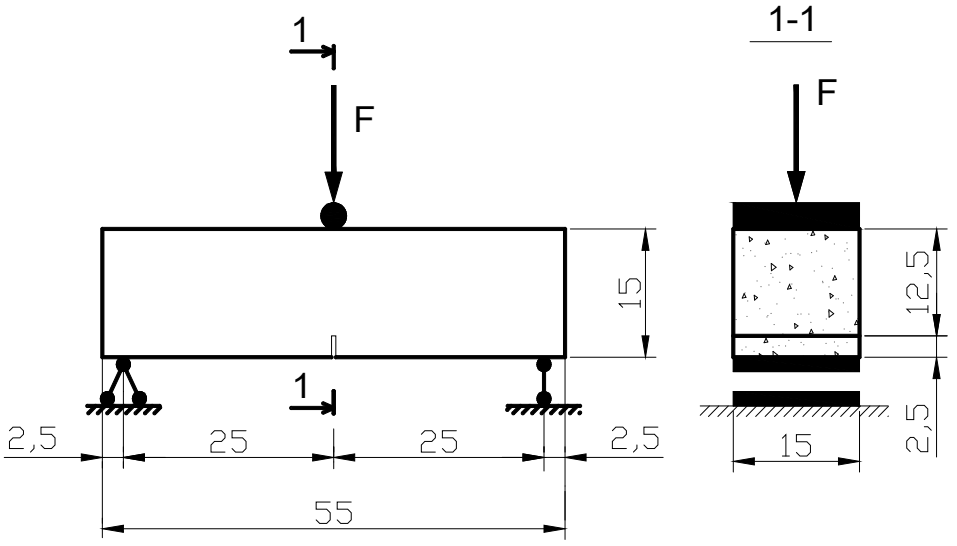


***Рисунок Б.1* – Схема испытания образца**

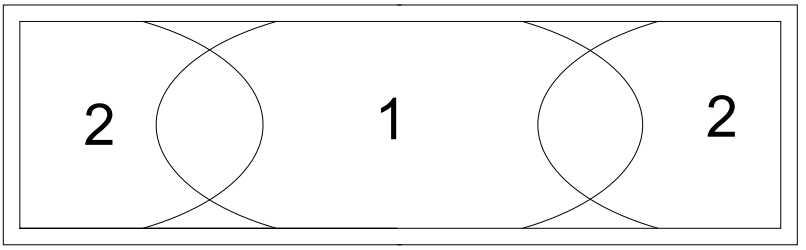
Б.3 Образцы

Б.3.1 Испытательные образцы должны быть изготовлены в форме призмы (балки) со стандартными размерами: шириной b = 150 мм, высотой h = 150 мм и длиной L = 550 мм. Количество образцов для испытаний – не менее 6.

Б.3.2 Испытательные образцы изготавливают и подготавливают к испытаниям согласно требованиям ГОСТ 10180 (раздел 4) и с учетом требований Б.3.3 и Б.3.4.

Б.3.3 Порядок заполнения формы бетонной или фибробетонной смесью следует принимать согласно приведенному на рисунке Б.2. Объем заполнения формы в центральной части (участок 1 на рисунке Б.2) должен быть равен суммарному объему заполнения крайних участков (участки 2 на рисунке Б.2). Первоначально форму следует заполнить приблизительно на 90 % высоты испытательного образца и уплотнить на

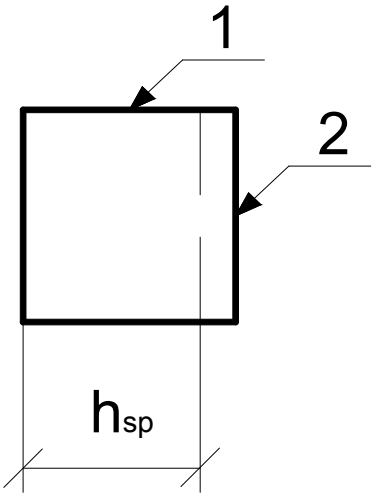
виброплощадке. При формовании образцов из самоуплотняющейся фибробетонной смеси форма заполняется и выравнивается без вибрации.



1, 2 – этапы заполнения формы

***Рисунок Б.2* – Порядок заполнения формы**

Б.3.4 Для выполнения надрезов в испытательных образцах используют мокрую резку. Надрез следует производить посередине образца в повернутом на 90° вокруг продольной оси его положении (см. рисунок Б.3).



1 – верхняя поверхность бетонирования; 2 – надрез

***Рисунок Б.3* – Расположение надреза, выполненного в испытательном образце**

Ширина прорези должна быть не более 5 мм, глубина – 25 мм ± 1 мм, расстояние между вершиной надреза и верхней гранью образца h_{sp} – 125 мм ± 1 мм .

Прорезь в образцах следует выполнять не ранее чем через 3 суток с момента их изготовления и не позднее чем за 3 часа до испытания.

Б.4 Подготовка испытательных образцов к испытанию

Б.4.1 Ширину образца и расстояние между вершиной надреза и верхней гранью образца следует определять по среднему из двух измерений, выполняемых штангенциркулем с точностью до 0,1 мм.

Б.4.2 Длину пролета образца следует определять на основании двух измерений расстояния по оси между опорными роликами с обеих сторон образца с помощью линейки с точностью 1 мм.

Б.5 Проведение испытаний

Б.5.1 В начале нагружения образца скорость перемещения активной траверсы испытательной машины следует принимать из условия обеспечения скорости приращения

перемещений внешних граней надреза a_F на 0,05 мм/мин, а после достижения перемещений внешних граней надреза значения a_F = 1,0 мм – из условия обеспечения скорости приращения перемещений внешних граней надреза на 0,2 мм/мин.

Б.5.2 Испытания необходимо проводить до достижения значения перемещений внешних граней надреза a_F, равного 4 мм, или до разрушения образца – в зависимости от того, что наступит раньше.

Б.5.3 Результаты испытаний, в ходе которых образование трещин зафиксировано за пределами надреза, считаются недействительными.

Б.6 Обработка результатов

Б.6.1 В ходе испытаний для каждого образца строят графики «F – a_F» (рисунок Б.4).

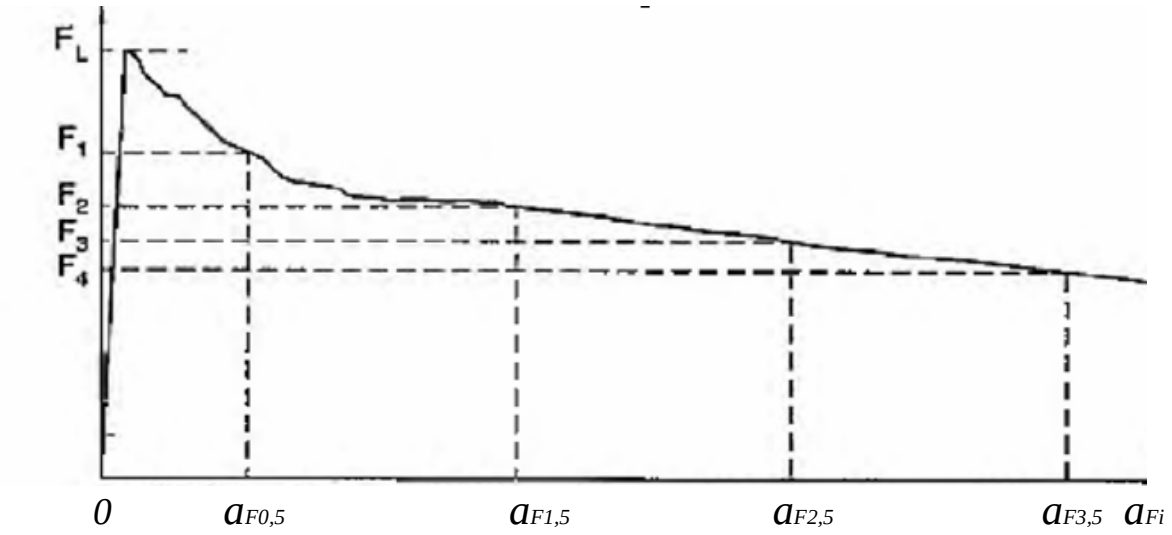


***Рисунок Б.4* – График «нагрузка – перемещение внешних граней надреза»**

Б.6.2 Для каждого образца определяют с точностью до 0,1 Н/мм^2 значения прочности $R_{F0,5}$ и $R_{F2,5}$ по формулам:

$$R_{F\,0,5} = \frac{3 \cdot F_{0,5} \cdot l}{2 \cdot b \cdot h_{sp}^2}, \qquad (Б.1)$$

$$R_{F\,2,5} = \frac{3 \cdot F_{2,5} \cdot l}{2 \cdot b \cdot h_{sp}^2}, \qquad (Б.2)$$

где F_{el} – максимальное значение нагрузки в интервале значений перемещения внешних граней надреза $0 < a_F \leq 0{,}05$ мм;

$F_{0,5}$ – значение нагрузки, соответствующее перемещению внешних граней надреза a_F = 0,5 мм;

$F_{2,5}$ – значение нагрузки, соответствующее перемещению внешних граней надреза a_F = 2,5 мм;

l – длина пролета, мм;

b – длина пролета, мм;

h_{sp} – расстояние между вершиной надреза и верхней гранью образца, мм.

Б.6.3 Нормативные значения остаточной прочности фибробетона на растяжение при изгибе определяют по формулам:

$$R_{fbt,n} = R_{F0,5,m} \cdot (1 - 1{,}64 \cdot v_{F0,5,m}), \quad (Б.3)$$

$$R_{fbt3,n} = R_{F2,5,m} \cdot (1 - 1{,}64 \cdot v_{F2,5,m}), \quad (Б.4)$$

где $R_{F0,5,m}$ и $R_{F2,5,m}$ – средние значения остаточной прочности фибробетона на растяжение при изгибе, Н/мм^2;

$v_{F0,5,m}$ и $v_{F2,5,m}$ – коэффициенты вариации, которые определяют по формулам:

$$v_{F0,5,m} = \frac{S_{F0,5,m}}{R_{F0,5,m}}, \quad (Б.5)$$

$$v_{F2,5,m} = \frac{S_{F2,5,m}}{R_{F2,5,m}}, \quad (Б.6)$$

здесь $S_{F0,5,m}$ и $S_{F2,5,m}$ – средние квадратичные отклонения, которые определяют по формулам:

$$S_{F0,5,m} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(R_{F0,5,i} - R_{F0,5,m})^2}{(n-1)}}, \quad (Б.7)$$

$$S_{F2,5,m} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(R_{F2,5,i} - R_{F2,5,m})^2}{(n-1)}}; \quad (Б.8)$$

n – число контрольных образцов-балок.

Б.6.4 В случае, если испытания контрольных образцов на осевое растяжение не производятся, класс фибробетона по прочности на осевое растяжение допускается назначать по результатам испытаний контрольных образцов-балок на изгиб в следующей последовательности.

Определяют для каждого образца с точностью до 0,1 Н/мм^2 значения прочности R_{Fel} по формуле:

$$R_{Fel} = \frac{3 \cdot F_{el} \cdot l}{2 \cdot b \cdot h_{sp}^2}, \quad (Б.9)$$

где F_{el} – максимальное значение нагрузки в интервале значений перемещения внешних граней надреза $0 < a_F \leq 0{,}05$ мм.

Вычисляют нормативные значения прочности фибробетона на растяжение при изгибе:

$$R_{fbt,n} = R_{Fel,m} \cdot (1 - 1{,}64 \cdot v_{Fel,m}), \quad (Б.10)$$

где $R_{Fel,m}$ – среднее значения прочности фибробетона на растяжение при изгибе, Н/мм^2;

$v_{Fel,m}$ – коэффициент вариации:

$$v_{Fel,m} = \frac{S_{Fel,m}}{R_{Fel,m}}, \quad (Б.11)$$

здесь $S_{Fel,m}$ – среднее квадратичное отклонение:

$$S_{Fel,m} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(R_{Fel,i} - R_{Fel,m})^2}{(n-1)}}, \qquad (Б.12)$$

Нормативное сопротивление фибробетона осевому растяжению принимают по формуле:

$$R_{ft,n} = 0{,}56 \cdot R_{fbt,n}. \qquad (Б.13)$$

Б.6.5 Если в процессе испытаний фиксируются только прогибы образца, связь между a_F и прогибом f принимают в виде:

$$f = 0{,}85 \cdot a_F + 0{,}04, \qquad (Б.14)$$

где f – прогиб, мм;

a_F – значение a_F, мм, которое:

- в случае если расстояние y от оси датчика перемещений до нижней грани испытываемого образца равно нулю – принимают равным замеренному в процессе испытания значению;
- в противном случае – вычисляют по формуле:

$$a_F = a_{Fy} \cdot \frac{h}{h+y}, \qquad (Б.15)$$

здесь h – полная высота образца.

Перевод графиков «нагрузка F – перемещение внешних граней надреза a_F» производят путем преобразования оси a_F, выполняемого с использованием данных, приведенных в таблице Б.1.

Таблица Б.1 – Значения прогибов f, соответствующих значениям a_F

a_F (мм)	f (мм)
0,05	0,08
0,10	0,13
0,20	0,21
0,50	0,47
1,50	1,32
2,50	2,17
3,50	3,02
4,00	3,44

УДК 624.012.3/4:691.328.44:625.877(083.13) ОКС 91.080.40

Ключевые слова: фибробетон, полимерная композитная фибра, конструкции и изделия из фибробетона, расчет по прочности, расчет по образованию трещин, расчет по деформациям.

Заместитель генерального директора по науке АО «НИЦ Строительство» А.И.Звездов

Ответственный исполнитель, главный научный сотрудник НИИЖБ им.А.А.Гвоздева Т.А.Мухамедиев