

В.В. ТУР

Брестский государственный технический университет

Т.М. ПЕЦОЛЬД

Белорусский национальный технический университет

К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ВЕЛИЧИНЫ ВТЯГИВАНИЯ КАНАТОВ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ПЛИТ ПУСТОТНОГО НАСТИЛА ПО ТЕХНОЛОГИИ БЕЗОПАЛУБОЧНОГО ФОРМОВАНИЯ

W artykule rozpatrzono zagadnienia związane z ocenianiem parametru wielkości wciągania liny podczas wykonania płyt produkowanych bez zastosowania formy-deskowania przy uwzględnieniu długości strefy przekazania naprężeń i długości odcinka zakotwienia. Uogólniono międzynarodową i krajową metodę, opracowano propozycję określającą kontrolne kryteria, zapewniające bezpieczne uwarunkowania pracy płyt kanałowych podczas eksploatacji.

ВВЕДЕНИЕ

Пустотные плиты безопалубочного формования являются в настоящее время наиболее широко применяемыми конструктивными элементами при устройстве перекрытий. Так, например, по данным [19] ежегодное производство таких изделий в Европе составляет около 20 млн. м², или от 40% до 60% от общего объема сборного железобетона, применяемого при возведении перекрытий зданий.

В 2008 г. в Республике Беларусь начата реализация программы внедрения плит пустотного настила, изготавливаемых по технологии безопалубочного формования. Следует отметить, что опыт изготовления и применения таких изделий (по технологии "MaxRoth") накапливался в национальной строительной отрасли достаточно давно [1].

Вместе с тем, остается определенный круг проблем, связанных как с изготовлением, так и с применением пустотных плит безопалубочного формования. Так, при изготовлении плит пустотного настила по технологии безопалубочного формования наблюдается втягивание напрягающих канатов при передаче усилия обжатия на бетон в процессе резки отформованной дорожки на отдельные конструктивные элементы заданной длины.

Естественно, что в подобной ситуации как у самих производителей, так и у контролеров, возникает закономерный вопрос: должно ли происходить

втягивание канатов и, если да, то какова допустимая величина втягивания и как далее наблюдаемый эффект повлияет на поведение конструктивного элемента под нагрузкой?

В соответствии с п. 4.8.12 СТБ 1383 [21] для плит безопалубочного формования "...не допускается средняя величина продольного смещения торцов напрягаемой арматуры относительно бетона более 2 мм". В представленном виде запись не только не конкретна (например, что понимать под "средней величиной продольного смещения"?), но и само значение параметра требует обоснования применительно к плитам безопалубочного формования, армированным семипроволочными канатами.

Следует отметить, что обеспечение совместной работы напрягающей арматуры и окружающего бетона в изделиях, изготовленных в экструдерах и слипформерах, является довольно сложной и, несмотря на широкое применение плит безопалубочного формования в мировой практике строительства, не изученной до конца проблемой. Качество изделий безопалубочного формования определяющим образом зависит от изменения параметров технологии безопалубочного формования, в частности требуемое сцепление напрягаемой арматуры с окружающим бетоном достигается, главным образом, качественной укладкой и уплотнением бетона на первой стадии формования (например, при использовании двухстадийной технологии формования в слипформерах).

1. ВЕЛИЧИНА ВТЯГИВАНИЯ КАНАТОВ И ДЛИНА ЗОНЫ ПЕРЕДАЧИ НАПРЯЖЕНИЙ

В предварительно напряженных конструкциях усилие обжатия передается с напрягаемой арматуры на бетон посредством сил сцепления, формирующихся по контакту напрягающего элемента с бетоном в процессе твердения вяжущего.

В плитах безопалубочного формования после освобождения канатов (при включении станции расслабления и при дальнейшей разрезке отформованной дорожки на отдельные изделия) напряжения в арматуре постепенно возрастают от нуля в сечении, проходящем по торцу плиты, до максимальных значений в некотором сечении, отстоящем от торца плиты на расстоянии, которое принято называть длиной зоны передачи напряжений (l_{pl} , рис. 1). Другими словами длина зоны передачи напряжений представляет собой расстояние от торца плиты до сечения, в котором устанавливаются постоянные напряжения в арматуре, т.е. за этим сечением на стадии обжатия напрягающая арматура и окружающий бетон работают совместно без взаимных смещений.

Следует отметить, что зависимость изменения напряжений в канатах по длине зоны передачи напряжений в общем случае является нелинейной и ее характер зависит от целого ряда факторов, важнейшими из которых следует считать:

- диаметр напрягающего каната;
- коэффициент трения между канатом и окружающим бетоном;
- прочность и плотность бетона;
- модули упругости и коэффициенты Пуассона стали и бетона.

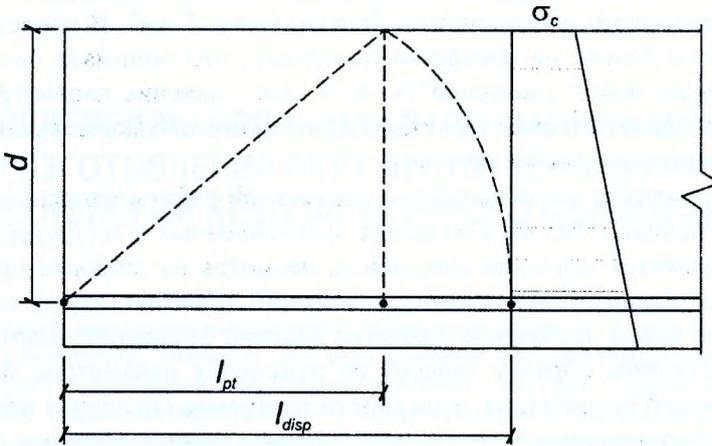


Рис. 1. К определению длины зоны передачи напряжений l_{pt} [5]

Несмотря на обширные исследования, выполненные в разное время [4, 14-18], до настоящего времени нет единого мнения об аналитической записи функции, описывающей изменение напряжений по длине зоны передачи l_{pt} после реализации усилия обжатия. В качестве примера на рисунке 2 представлен вид наиболее известной диаграммы, характеризующей распределение напряжений в арматуре по длине зоны передачи [18]. Здесь следует отметить, что представленная диаграмма получена при испытании образцов предварительно напряженных конструкций, изготовленных из тяжелого бетона с использованием традиционных технологий виброуплотнения.

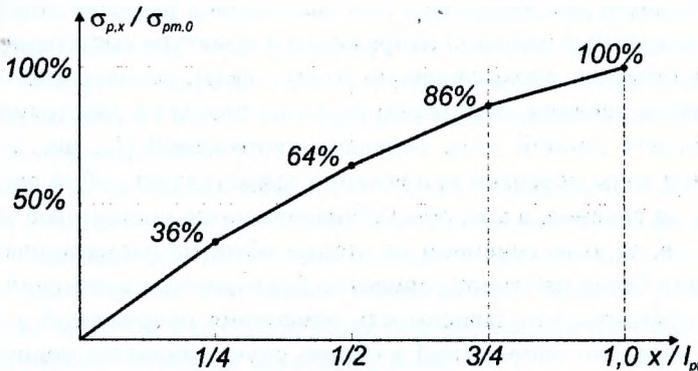


Рис. 2. Диаграмма распределения напряжений в канатах по длине зоны передачи напряжений согласно [18]

Документы *fib* [14, 15] предлагают применять т.н. пошаговую (*step by step*) процедуру для установления параметров сцепления, а далее и длины зоны передачи напряжений в конкретных конструкционно-технологических ситуациях.

В общем случае алгоритм для определения длины зоны передачи напряжений l_{pt} может быть представлен простейшей блок-схемой, показанной на рисунке 3.

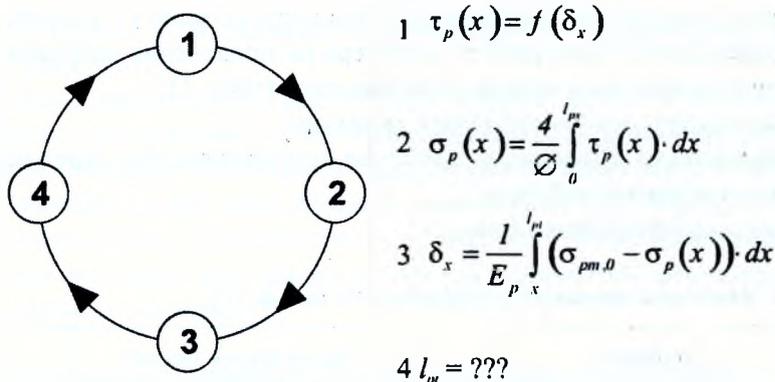


Рис. 3. Укрупненная блок-схема алгоритма для определения длины зоны передачи напряжений согласно [14]

Решение базируется на следующих положениях:

1. Касательные напряжения сцепления, действующие по контакту напрягаемой арматуры и бетона зависят от величины взаимного смещения (закон сцепления $\tau_p(x) = f(\delta_x)$).
2. Распределение напряжений по длине каната зависит от распределения касательных напряжений сцепления по длине зоны, отсчитываемой от торца элемента до рассматриваемого сечения

$$\left(\sigma_p(x) = \frac{4}{\varnothing} \int_0^{l_{px}} \tau_p(x) \cdot dx \right).$$

3. Смещения каната относительно окружающего бетона зависят от упругого укорочения каната на участке между рассматриваемым сечением и сечением с установившимися напряжениями (конец зоны передачи напряжений)

$$\left(\delta(x) = \frac{l}{E_p} \int_x^{l_{pt}} [(\sigma_{pm,0} - \sigma_p(x))] \cdot dx \right).$$

Таким образом, если предварительное напряжение реализуется при передаче усилия обжатия с арматуры на бетон за счет сил сцепления, на конечном участке элемента формируется т.н. зона передачи напряжений, в пределах которой наблюдаются несовместные деформации арматуры и бетона, а следовательно, и их взаимные смещения, которые проявляются во втягивании напрягающей арматуры на торце элемента.

В общем случае длина зоны передачи напряжений линейно связана с величиной втягивания каната на торце элемента и, в соответствии с [4, 14, 18], эта взаимосвязь выражается зависимостью:

$$l_{pl} = \alpha_0 \frac{E_p}{\sigma_{pm,0}} \delta_e \quad (1)$$

где:

- l_{pl} - длина зоны передачи напряжений при отпуске каната с упоров;
- α_0 - коэффициент, зависящий от характера распределения напряжений в канате на длине зоны передачи напряжений (табл. 1);
- E_p - модуль упругости напрягаемой арматуры;
- $\sigma_{pm,0}$ - напряжения в напрягаемой арматуре непосредственно перед передачей усилия обжатия на бетон;
- δ_e - величина втягивания каната.

Таблица 1. Числовые значения коэффициента α_0 в ф. (1)

Источник	Напрягающий элемент	α_0
Gyon, 1951 [4]	проволока гладкая	3,0
Bruggeling A. [15]	проволока	3,0
RILEM-FIB-CEB-RCP-14-1979	проволока	3,5
PCI Manual [19]	семироповлочный канат	2,0

Несложно заметить, что зависимость (1) представляет собой, по- существу, известную формулу И. Гийона (Gyon), использованную с некоторыми модификациями при разработке СНиП II-B.1-62*, СНиП II-21-75 и СНиП 2.03.01-84*.

Следует иметь ввиду, что длина зоны передачи напряжений зависит от способа передачи усилия обжатия. Так, при резкой (мгновенной) передаче усилия обжатия длина зоны l_{pl} может возрастать даже на 60% по сравнению с аналогичной величиной, получаемой при плавном отпуске каната. В СНБ 5.03.01 [1] этот эффект учитывается при вычислении базовой длины l_{pl} введением повышающего коэффициента α_1 , равного 1,25.

В соответствии с требованиями СНБ 5.03.01 [1] при расчете базовой длины передачи напряжений l_{pl} учитываются основные факторы, влияющие на условия обеспечения совместной работы напрягающего элемента и бетона (прочность бетона при растяжении к моменту передачи усилия обжатия, косвенные характеристики поверхности арматуры, ее диаметр, величина напряжений в арматуре к моменту передачи усилия обжатия):

$$l_{pl} = \frac{\alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \sigma_{pm,0}}{\eta_{pl} \cdot \eta_l \cdot f_{ctd}(f)} \varnothing \quad (2)$$

где:

- α_1 - коэффициент, учитывающий способ передачи усилия обжатия (при резкой передаче $\alpha_1 = 1,25$);
- α_2 - коэффициент, принимаемый для семипроволочных канатов равным 0,19;
- \varnothing - номинальный диаметр каната;
- $\sigma_{pm,0}$ - напряжения в канате сразу после передачи усилия обжатия на бетон (с учетом всех первых технологических потерь);
- η_{p1} - коэффициент, учитывающий условия сцепления и принимаемый равным для канатов 3,2.

В таблице 2 представлены расчетные и средние значения базовой длины зоны передачи напряжений l_{p1} , а также значения l_{p1} - длины зоны передачи напряжений непосредственно при отпуске натяжения и l_{p2} - при эксплуатации. Средние значения длины зоны передачи напряжений $l_{p1,m}$, определенные при средних прочностных характеристиках бетона, могут быть использованы для определения величины втягивания канатов δ_e , пригодной для оперативного производственного контроля.

Таблица 2. Расчетные и средние значения базовой длины зоны передачи напряжений l_{p1} согласно СНБ 5.03.01 [5]

Вариант	Передача усилия обжатия	$f_{cm,0}$ МПа	Прочность сцепления f_{bp} МПа		α_1	α_2	$\varnothing_{ном}$	Длина зоны передачи напряжений мм		
			расчетная f_{bp1}	средняя f_{bp1}				базовая l_{p1}	$l_{p1} = 0,8 \cdot l_{p1}$	$l_{p2} = 1,2 \cdot l_{p1}$
1	плавная мгновенная	40,0	4,32		1,0	0,19	9,0	445,3	356,2	534,4
			4,32		1,25			556,6	445,3	667,92
2	плавная мгновенная	40,0		9,28	1,0	0,19	9,0	207,3	165,8	248,8
				9,28	1,25			259,1	207,3	310,9
1	плавная мгновенная	40,0	4,32		1,0	0,19	12,0	593,8	475,0	712,6
			4,32		1,25			742,0	593,6	890,4
2	плавная мгновенная	40,0		9,28	1,0	0,19	12,0	276,4	221,1	331,7
				9,28	1,25			345,5	276,0	414,6
1	плавная мгновенная	40,0	4,32		1,0	0,19	15,0	742,2	593,6	890,6
			4,32		1,25			927,73	742,2	1113,3
2	плавная мгновенная	40,0		9,28	1,0	0,19	15,0	345,5	276,4	414,6
				9,28	1,25			431,8	345,5	518,2

Примечание: Базовая длина зоны передачи напряжений определена при величине $\sigma_{pm,0} = 1077$ МПа, что близко соответствует условиям производства филиала "Завод ЖБК" ОАО "Строительный трест № 8" г. Бреста

В таблице 3 приведены расчетные значения длины зоны передачи напряжений, определенные по нормам различных стран.

Таблица 3. Расчетные значения длины зоны передачи напряжений l_{pr1}

№ п/п	Документ	Структура расчетной зависимости	Расчетная длина зоны передачи напряжений l_{pr1} [мм] при диаметре каната $\varnothing_{ном}$ [мм]		
			9,0	12,0	15,0
1	СНБ 5.03.01 EN 1991-1-2	$l_{pr1} = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \varnothing \cdot \sigma_{pm,0} / f_{hpr1}$ $f_{hpr1} = \eta_{pr1} \cdot \eta_1 \cdot f_{ctd}$ $l_{pr1} = 0,8 \cdot l_{pr1}$	445,3	593,6	742,2
2	ACI-318 BS8110	$l_{pr1} = \frac{\sigma_{pm,0}}{K} \varnothing$ $K = 21 (K = 38)$	482,14 (266,45)*)	642,86 (355,63)	803,6 (445,0)
3	СП 52-102-2004	$l_{pr1} = \frac{\sigma_{pm,0}}{4 \cdot R_{bond}} \varnothing_{ном}$ но не менее 300 мм $R_{bond} = 2,2 \cdot f_{ctd}$	855,0	1140,0	1425,0
4	ISO:1332-1980	30 \varnothing	270,0	360,0	450,0

Примечание: В скобках приведены значения при опытным значении $K_0 = 38$ согласно [19], $\sigma_{pm,0} = 1077$ МПа; $f_{cm,0} = 40$ МПа; $f_{hpr1} = 4,32$ МПа.

Как видно из результатов, представленных в таблице 3, длина зоны передачи напряжений l_{pr1} , рассчитанная по различным нормативным документам существенно различается, что, безусловно, влияет и на расчетное значение втягивания каната δ_c . Выбор норм для сравнения не был случайным. Зависимости, включенные в СНБ 5.03.01 [5] и EN 1991-1-2 [10], выражают прочность сцепления через прочность бетона на растяжение $f_{ctd}(t)$ к моменту передачи усилия обжатия, формулы ACI318 [7] и BS8110 [9] вообще не содержат характеристик свойств бетона, а учитывают их косвенно, требуя назначения передаточной прочности не менее 30 МПа. Стандарт ISO 1343 содержит требование, выражающее длину зоны передачи напряжений в количестве номинальных диаметров ($\beta = l_{pr1}/\varnothing$). Это требование, установленное нормами различных стран, приведено в таблице 4. Надо отметить, что это некоторые граничные значения, определенные для указанных уровней предварительного напряжения.

Несложно заметить, что расчетные значения длины зоны передачи напряжений, определяемые по нормам различных стран, существенно отличаются. Это связано, с одной стороны, с различными методическими подходами к определению длины l_{pr1} , а с другой - со значительным разбросом опытных данных.

В таблице 4 не упоминаются требования, устанавливаемые нормативными документами Германии, т.к. в DIN 45227 не приводятся нормируемые значения β . При этом, значения β упоминаются как "допускаемые" ("Zulassung"). Эти "допускаемые" значения согласно [13] составляют: 75; 65; 55 мм/мм соответственно для средней передаточной прочности бетона 35; 45; 55 Н/мм².

Следует иметь в виду, что в соответствии с DIN 4227 напряжения в канатах несколько меньше тех, что указаны в таблице 4 для большинства норм.

Таблица 4. Расчетные значения относительной длины зоны передачи напряжений β по нормам различных стран (для семипроволочных канатов)

Нормативный документ	Напряжения в арматуре в момент передачи усилия обжатия, МПа	Отношение длины зоны передачи напряжений l_{pr} к номинальному диаметру каната ($\beta = l_{pr}/\varnothing$) при средней передаточной прочности бетона $f_{cm,0}$, МПа		
		30	40	50
ASO [8] канат \varnothing 12,5 мм	1450	183/11,2	135/8,4	нет данных
ACI-318R [7]	1400	66/3,5 ^{*)}	66/3,5	66/3,5
BS 8110 [9]	$\leq 0,75 \cdot f_{pk}$	44/2,3	38/1,7	34/1,4
EN 1992-1 [10]	≥ 1200	70/3,5	60/2,7	нет данных
NEN 6720 [11]	1450	66/4,0	59/3,6	нет данных
PN 84/B [12]	1350	78/4,4	61/3,5	нет данных
СНиП 2.03.01 [22]	1000	63/3,6	53/2,9	—

^{*)} После черты приведены соответствующие средние значения втягивания каната $\delta_{e,m}$, мм (при $\varnothing_{кант} = 12$ мм)

Данные, приведенные в американских документах [7, 8], дают очень высокие значения длины передачи напряжений и соответственно втягивания канатов. Они получены, главным образом, из опыта практического применения и лабораторных испытаний мостовых конструкций. Как видно из данных, приведенных в таблице 4, практически все нормы (за исключением BS 8110) определяют среднюю величину втягивания каната более 2 мм.

2. ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЛИНЫ ЗОНЫ ПЕРЕДАЧИ НАПРЯЖЕНИЙ В ПЛИТАХ БЕЗОПАЛУБОЧНОГО ФОРМОВАНИЯ

Как уже отмечалось ранее, расчетные зависимости, применяемые для определения длины анкеровки напрягающих элементов, включенные практически во все нормы, базируются на опытных данных, полученных при испытаниях конструкций из тяжелого бетона, изготовленных по технологиям виброуплотнения (при нормальных водоцементных отношениях). Плиты безопалубочного формования выполняют из жестких бетонных смесей (жесткостью от 17 с до 20 с), что накладывает дополнительные эффекты на совместную работу напрягающих элементов с бетоном как на стадии обжатия, так и при эксплуатационных нагрузениях.

Как было показано в работах *Anderson* [19] и подтверждено исследованиями *Brooks, Gerstle* и *Logan* [14, 20], мерой удовлетворительного сцепления является вытягивание напрягающего элемента на свободном торце плиты после разрезки отформованной дорожки. Граничное значение вытягивания на свободном торце предложено рассчитывать по формуле (в системе SI):

$$\delta_{all} = \frac{\sigma_{pm,0(\infty)} \cdot \sigma_{p,max}}{41 \cdot E_p} \cdot \varnothing \quad (3)$$

где:

$\sigma_{pm,0(\infty)}$ - напряжения в канатах с учетом потерь;

$\sigma_{p,max}$ - начальные напряжения в канатах перед передачей усилия обжатия.

Это выражение дает укорочение каната на длине зоны передачи напряжений. Например, для каната с номинальным диаметром $\varnothing_{nom} = 12,7$ мм, начальные напряжения в котором составляют $\sigma_{p,max} = 1300$ МПа, вытягивание на свободной грани не должно превышать 2,4 мм.

Если вытягивание каната превышает δ_{all} , то имеет место увеличение длины зоны передачи напряжений и длины анкеровки по сравнению с расчетными значениями.

В процессе контроля качества при производстве плит безопалубочного формования предполагается измерение величины вытягивания канатов. Если в процессе такого контроля установлено, что величина вытягивания превышает допустимые значения δ_{all} , необходимо выполнить перерасчет предельной нагрузки на плиту с учетом фактической длины зоны передачи напряжений и длины анкеровки. В соответствии с [19] для расчета длины зоны передачи напряжений и длины анкеровки могут быть применены расчетные формулы (для каждого из канатов):

$$l_{pl2} = \frac{2 \cdot \delta_{l(on)} \cdot E_p}{\sigma_{p,max}} \quad (4)$$

$$l_{bpd} = l_{pl2} + \frac{\delta_{l(on)} \cdot E_p \cdot (\sigma_{pd} - \sigma_{pm,\infty})}{\sigma_{p,max} \cdot \sigma_{pm,\infty}} \quad (5)$$

Если в ф. (4) и (5) подставить выражение граничной величины вытягивания каната по ф. (3), получаем достаточно простые выражения, пригодные для контроля:

$$l_{pl} = \frac{\sigma_{pm,\infty}}{21} \cdot \varnothing \quad (6)$$

$$l_{bpd} = l_{pl} + \frac{1}{7} (\sigma_{pd} - \sigma_{pm,\infty}) \cdot \varnothing \quad (7)$$

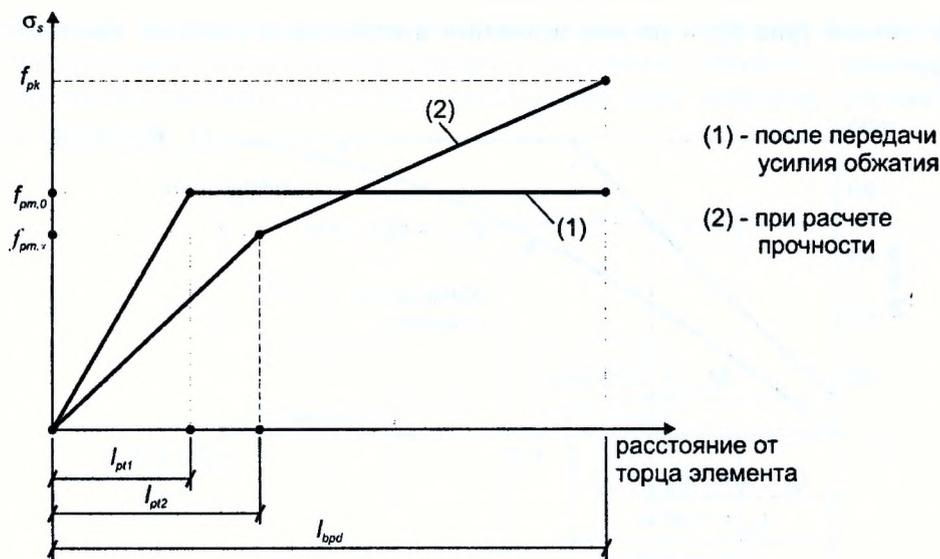


Рис. 4. К определению длины анкеровки напрягающей арматуры l_{bpd} согласно [5]

В исследованиях *Walwaren* и *Mercx* [20] показано, что формулы (6) и (7) достаточно хорошо описывают длину зоны передачи напряжений и длину анкеровки в плитах безопалубочного формования.

Параметрические исследования, выполненные *Akesson* [14] для плит безопалубочного формования высотой 215; 265 и 380 мм, армированных семипроволочными канатами $\varnothing = 12,9$ мм, показали, что при средней передаточной прочности бетона $47,5 \text{ Н/мм}^2$ ($C^{30}/_{37}$) в знаменателе ф. (6) следует принимать не 21, а 38 (т.е. длина зоны передачи напряжений составляет около $26\varnothing$). Полученные результаты были подтверждены опытами по вытягиванию канатов, выполненных *Tassi* и *Giltoft* [14].

Следует отметить, что расчетная зависимость (2), внесенная в СНБ 5.03.01 [5] и вслед за EN 1992-1-1 [10], могут быть преобразованы к подобному виду. Так, принимая для канатов $\eta_{p2} = 3,2$; $\alpha_2 = 0,19$; $\alpha_1 = 1,25$; $\eta_1 = 1,0$, зависимость (2) получает вид:

$$l_{pt} = \frac{\sigma_{pm,0}}{13,5 \cdot f_{ctd}(t)} \varnothing \quad (8)$$

При средней передаточной прочности 40 Н/мм^2 знаменатель выражения (8) становится равным 39,2.

Безусловно, что выполнять подобные перерасчеты возможно лишь в тех стадиях, когда требуется оценить фактическую несущую способность изготовленного изделия.

В связи с этим, на стадии проектирования следовало бы построить для группы изделий (например, под одну полезную нагрузку) соответствующие диаграмм-

мы усилий (рис. 5), а из них назначить контрольные значения втягивания канатов.



Рис. 5. Диаграмма усилий при расчете плиты безопалубочного формования по прочности

На рисунке 5 в качестве примера представлена диаграмма усилий для свободно опертой плиты безопалубочного формования длиной 6 м, шириной 1,5 м, армированной $6\varnothing 12$ Y1860S7 ($f_{pk} = 1770$ Н/мм²; $\sigma_{pm,\infty} = 1044$ Н/мм²), нагруженной равномерно распределенной расчетной нагрузкой $q = 14,2$ кПа.

В соответствии с представленной диаграммой расчетная величина втягивания каната не должна превышать $\delta_{all} = 1,88$ мм при действии равномерно распределенной нагрузки. В свете представленного примера ограничение, принятое в СТБ 1383 [21] является близким к допустимому. Ситуация может несколько усугубиться при появлении в приопорной зоне сосредоточенных сил, создающих градиенты на эпюре моментов, что создает опасность образования трещин нормального отрыва не только на участке длины анкеровки, но и зоны передачи напряжений.

3. ДЛИНА ЗОНЫ ПЕРЕДАЧИ НАПРЯЖЕНИЙ, ДЛИНА ПЛОЩАДКИ ОПИРАНИЯ И ДЛИНА АНКЕРОВКИ

В соответствии с рекомендациями, содержащимися в ISO 1343 и BS 8110, длина зоны передачи напряжений не должна располагаться в пределах чистого пролета плиты. Это условие иллюстрировано на схемах рисунка ба и б (соответственно для свободно опертых плит и плит, заделанных в стены), позаимствованных из ISO 1343.

Пользуясь представленными рекомендациями длина площадки опирания для анализируемых плит безопалубочного формования должна составлять от

445 мм до 742 мм (при равенстве расчетной длине зоны передачи напряжений). Для сравнения: плиты, изготовленные по технологии "MaxRoth", армированные высокопрочной проволокой, имели длину зоны передачи напряжений до 570 мм [2].

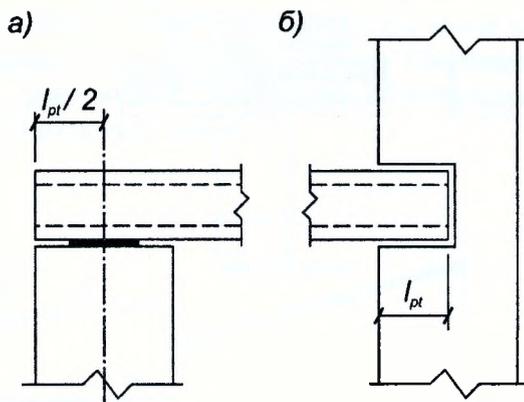


Рис. 6. Рекомендуемые длины опирания плит безопалубочного формования согласно ISO 1343 при свободном опирании (а) и заделке в стену (б)

Вместе с тем, практически все международные рекомендации по применению плит безопалубочного формования [19, 20] (см. табл. 5 и рис. 7), опираясь на п. 5.2.3 BS 8110 [9], устанавливают значительно более короткие площадки опирания, минимальные длины которых в общем случае составляют:

- при опирании на кирпичные стены - не менее 100 мм;
- при опирании на бетонные и стальные элементы - не менее 75 мм.

Таблица 5. Номинальная длина опирания для свободно опертых плит безопалубочного формования согласно [20]

Материал несущей (опорной) конструкции	Толщина плиты, мм	Длина (глубина) опирания, мм	
		номинальная	минимальная
Бетон или сталь	от 150 до 265	70,0	50,0
Кирпичная стена		100,0	80,0

Приведенные выше величины опирания плит безопалубочного формования могут быть обоснованы, принимая во внимание два обстоятельства.

Во-первых, увеличение глубины опирания, главным образом при заделке плит в кирпичные стены, приводит к появлению нежелательных (с точки зрения надежности) отрицательных опорных моментов. При этом следует иметь ввиду, что установленной в верхней зоне плиты стабилизирующей арматуры явно недостаточно для восприятия опорных моментов. Так, исследования плит безопалубочного формования, изготовленных по технологии "MaxRoth",

выполненные в 1980..1982 г.г. НИИЖБ и Уральским ПромСтройНИИПроектом [2, 3], показали, что при нагружении первые трещины образовывались в опорных сечениях в верхней полке плиты и практически беспрепятственно развивались к нижней полке.

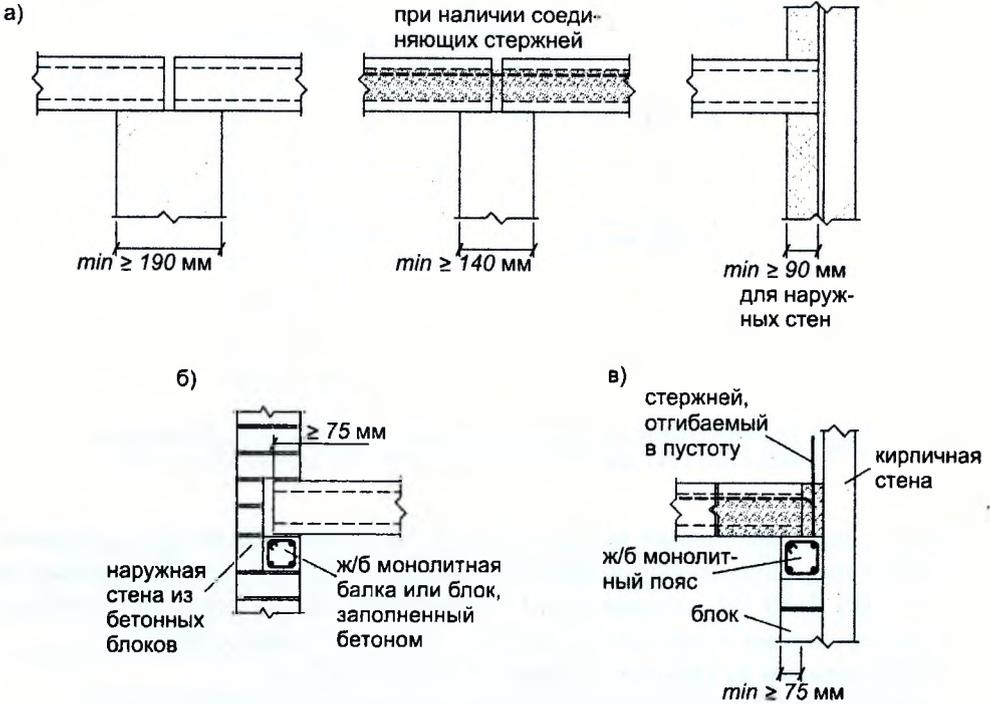


Рис. 7. Схемы опирания плит безопалубочного формования согласно: (а) - опирание на внутренние и наружные стены; (б), (в) - опирание на железобетонную балку в наружной стене [19, 20]

При этом ширина раскрытия трещин в опорных сечениях достигала от 10 мм до 15 (!) мм. Было выявлено два характерных случая образования трещин, показанные на рисунке 8.

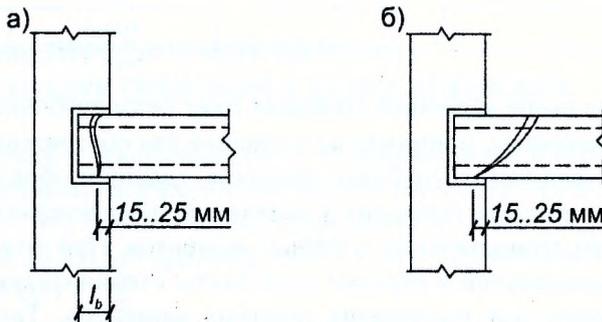


Рис. 8. Характер трещинообразования плит в опытах [2]

На рисунке 9 показано изменение коэффициента степени защемления k_m в кирпичной кладке и бетонных блоках по результатам, полученным в опытах [2], при изменении глубины опирания плиты от 100 до 200 мм и прижимающего давления от 1,0 до 3,5 Н/мм². Как видно из графиков, представленных на рисунке 9, наибольший эффект с точки зрения снижения эффекта защемления ($k_m \approx 0,5$) в кирпичных стенах наблюдается при длине площадки опирания $l_b = 100$ мм (независимо от величины пригруза). При опирании на бетонные блоки значение коэффициент k_m изменяется незначительно, независимо от глубины опирания и величины пригруза.

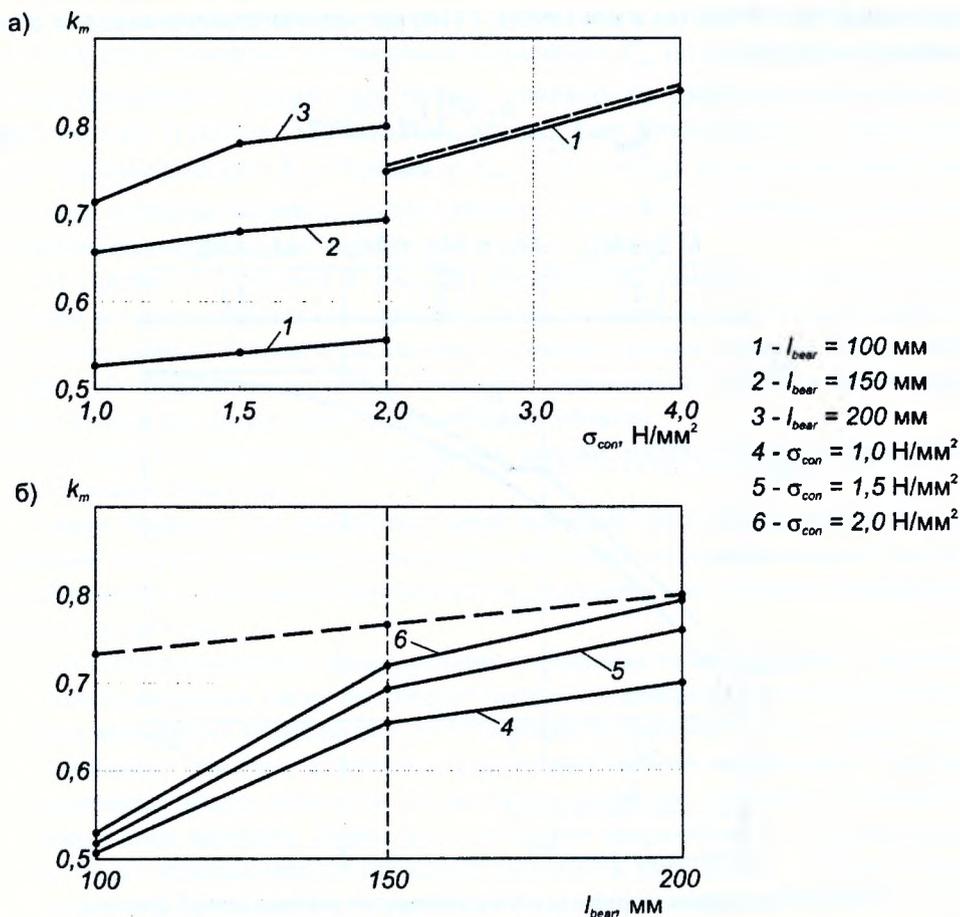


Рис. 9. Изменение коэффициента степени защемления k_m в кирпичной кладке (—) и бетонных блоках (-----) согласно данным [2]

Во-вторых, сокращение глубины опирания приводит к увеличению местных сжимающих напряжений, действующих на опорных площадках. Появление довольно ощутимого местного сжатия улучшает условия анкеровки канатов

в эксплуатационной стадии (при условии, что выполняются условия прочности при местном сжатии).

Таким образом, назначение глубины опирания во взаимосвязи с длиной зоны передачи напряжений, а соответственно и с контролируемой величиной вытягивания канатов, относится к разделу оптимизационных задач. При этом, выполняя анализ следует учитывать целый ряд факторов, изменяющихся в достаточно широком диапазоне (например, различные диаметры напрягаемых канатов, условия реализации потерь и т.д.).

Длину зоны передачи напряжений l_{pl} следует рассматривать как компоненту длины анкерówki l_{hpd} напрягаемых канатов (рис. 10). В соответствии с требованиями СНБ 5.03.01 [5] и EN 1992-1-1 [10] расчетную длину анкерówki определяют по формуле:

$$l_{hpd} = l_{pl2} + \frac{\alpha_2 \cdot \sigma (f_{pd} - \sigma_{pm, \infty})}{f_{hpd}} \quad (9)$$

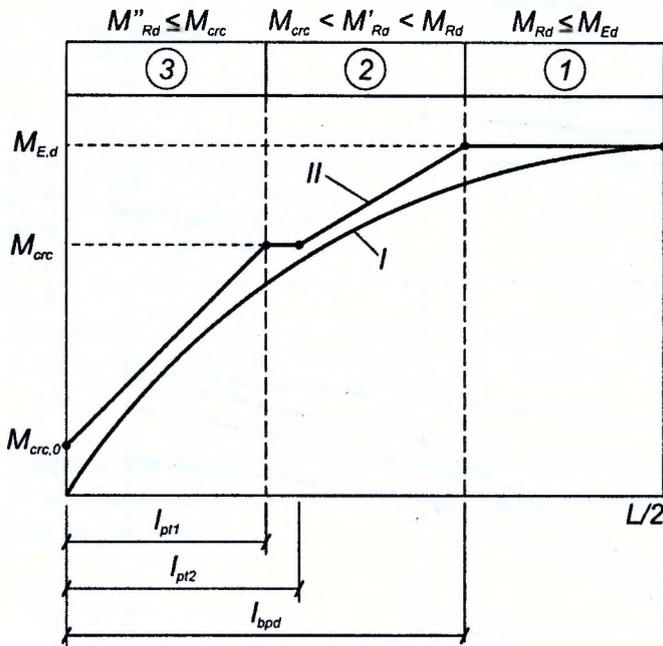


Рис. 10. Диаграмма усилий для случая равномерно распределенной нагрузки

Как следует из ф. (9), длина анкерówki определяет положение сечения, в котором напрягаемая арматура может быть использована с полным расчетным сопротивлением ($x \geq l_{hpd}$, зона 1 рис. 10). Очевидно, что в сечениях, расположенных на участке $l_{pl2} \leq x < l_{hpd}$ (зона 2, рис. 10), расчетные значения предельного момента (при условии, что здесь образуются трещины от расчетных нагрузок) следует определять при напряжениях:

$$f'_{pd} = \sigma_{pm,\infty} + \frac{(x - l_{pl2})}{l_{bpd}} (f'_{pd} - \sigma_{pm,\infty}) \quad (10)$$

где x - расстояние от торца элемента до рассматриваемого сечения.

На выделенном участке (зона 2, рис. 10) расчетный момент, который способно воспринять сечение, превышает момент появления трещин, но является меньшим, чем предельный момент, определенный для зоны 1, рис. 10.

В исследованиях *Martin* и *Korkosz* [19] показано, что на длине участка $l_{pl2} \leq x < l_{bpd}$ относительные деформации в сжатом бетоне не достигают предельных значений. Поэтому значения предельных моментов рекомендуется рассчитывать, принимая напряжения в арматуре f'_{pd} по ф. (10), а при определении параметров сжатой зоны бетона, опираясь на уравнения совместности деформаций. В работе [18] показано, что для плит безопалубочного формования при напряжениях f'_{pd} , близких к $\sigma_{pm,\infty}$ (т.е. $x \approx l_{pl2}$), деформационный расчет дает значение момента, составляющего около 85% от момента в этом же сечении, вычисленном по методу предельных усилий.

На участке $x < l_{pl2}$ (зона 3, рис. 10) предельный момент определяется значением момента образования трещин, вычисленного при расчетных характеристиках свойств бетона и расчетных значениях усилия обжатия. Если в зоне 3, рис. 10 образуются изгибные трещины, разрушение элемента происходит практически мгновенно при продергивании канатов.

На рисунке 10 представлена диаграмма усилий, иллюстрирующая представленное выше описание.

Таким образом, при разработке серий чертежей плит безопалубочного формования следует назначать допустимую величину втягивания каната исходя из обеспечения требований безопасности, пользуясь следующими рекомендуемым алгоритмом:

1. Для соответствующего конструктивного решения плиты, условий опирания, схем приложения нагрузок следует построить диаграмму усилий (изгибающих моментов), подобно той, что показана на рисунке 5 или 10. При этом, положение сечения, в котором расчетный момент образования трещин пересекает эпюру моментов от расчетных нагрузок, определяет, очевидно, предельное значение длины зоны передачи напряжений $l_{pl2,u}$, при которой не будут образовываться изгибные трещины в зоне 3, рис. 10. Полученное значение $l_{pl2,u}$ сравнивают с расчетным l_{pl2} , полученным по СНБ 5.03.01 [5].
2. Рассчитывают длину зоны передачи напряжений $l_{pl1,u}$ в соответствии с СНБ 5.03.01 [5]: $l_{pl1,u} = l_{pl2,u}/1,5$ и далее предельно допустимое значение втягивания каната по ф. (4). Величина втягивания каната, определенная при расчетных значениях l_{pl1} , не должна быть больше, чем $0,8 \cdot \delta_{l,u}$.
3. Проверяют длину анкеровки по ф. (7) с учетом предельного значения $l_{pl2,u}$. В случае, если длина анкеровки оказывается большей, чем половина длины элемента, необходимо произвести корректирующий расчет и уточнить зна-

чение предельного момента (при том, что напрягающие канаты работают с напряжениями f'_{pt}).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Величина втягивания каната, регистрируемая в процессе изготовления плит безопалубочного формования, является важным показателем, характеризующим сцепление напрягающего элемента с бетоном. Предельное значение величины втягивания может быть определено по ф. (3).
2. При проектировании плит безопалубочного формования следует анализировать диаграммы усилий (например, как на рис. 5, 10) для объективного выявления характера разрушения и назначения расчетных характеристик напрягаемой арматуры.
3. В процессе контроля при производстве плит безопалубочного формования следует определять величину втягивания каната $\delta_{l(on)}$, сравнивать ее с допустимым значением δ_{all} , рассчитанным по ф. (3). Для оперативного контроля может быть рекомендовано условие оценивания длины зоны передачи напряжений:

$$l_{pt} = \frac{2 \cdot \delta_{l(on)} \cdot E_p}{\sigma_{pm,0}} \leq \frac{\sigma_{pm,0}}{38} \varnothing \quad (11)$$

Если условие не выполняется, необходимо корректировать величину расчетной нагрузки на плиту в сторону ее уменьшения.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Пецольт Т.М., Тур В.В., Безопалубочное формование на длинных стендах предварительно напряженных многпустотных плит, Строительная наука и техника 2006, 6, 27-30.
- [2] Крамарь В.Г., Арзумян К.М., Эпп А.Я. и др., Влияние защемления в стенах на прочность и трещиностойкость панелей безопалубочного формования, Бетон и железобетон 1983, 2, 8-9.
- [3] Заключение об особенностях работы многпустотных плит стендового безопалубочного формования в составе здания и о возможных конструктивных решениях, позволяющих применять плиты в кирпичных блочных домах повышенной этажности, НИИЖБ, М.: 2003, рук. темы В.Г. Крамарь.
- [4] Gyon (1951) - Béton Précontraint, Paris 1951.
- [5] СНБ 5.03.01. Бетонные и железобетонные конструкции.
- [6] СНиП 2.03.01-84*. Бетонные и железобетонные конструкции.
- [7] ACI Manual 318R-86 art. 12.9 - Interim, 1990 - USA - 278 p.
- [8] AASHTO. American Association of State Highway and Transportation Officials/ Standard Specification for Highway Bridges.- 16th Edition, Washington D.C., 1996 - art. 9.28.
- [9] British Standard BS8110: Part 1: 1997, Section Four, art. 4.10.

- [10] EN 1992-1-1. General Rules and Rules for Buildings: Section Four, art. 4.10.
- [11] NEN6720-1991. NNI Netherlands, art. 9.7, page 203.
- [12] PN-84/B-03264, art. 8.2.3.
- [13] DIN 1045, art. 8.4.1.
- [14] Bond of reinforcement in concrete. State-of-art prepared by Task Group Bond Models (former CEB Task Group 2.5/fib report 100 (2000), August 2000, Ch. 6, 120 p.
- [15] Bruggeling A.S.G. Transmission of prestress by bond/ Internal Report of TG9.4 to Commission. 2000, 38 p.
- [16] Bruggeling. Manual "Theorie en Praktijk van het vo orgespannen beton", 2 volumes 10050 p.- t. Koggeschip.
- [17] Bruggeling. The transmission length of pretensioning prestressed steel. Proceeding Tenth International Congress of FIP, part 4, NewDelhi, India, 1986, p. 117-127.
- [18] Lopez M.R., Carmo N.F., Bond of prestressed strands to concrete: transfer rate and relationship between transmission length and tendon draw-in, Structural Concrete 2002, 3, 117-126.
- [19] PCI Manual for the design of Hollow Core Slabs/ Second Edition, PCI, Chicago 1988, 120 p.
- [20] Quality Assurance and Recommended Connections of Prestressed Hollow Core Slabs - BSI, London 1998.
- [21] СТБ 1383. Плиты покрытий и перекрытий железобетонные для зданий и сооружений. Технические условия.
- [22] СНиП 2.03.01-84*. Бетонные и железобетонные конструкции. Нормы проектирования.