

УДК 624.041

Виктор Владимирович ТУР,
доктор технических наук,
профессор,
заведующий кафедрой
"Технология бетона
и строительные материалы"
Брестского государственного
технического университета

Владимир Владимирович МАЛЫХА,
инженер Брестского государственного
технического университета

**Максим Александрович
ПЕТРОПАВЛОВСКИЙ,**
магистр,
начальник испытательного центра
Брестского государственного
технического университета

Валерий Николаевич СИНЕЛЬНИКОВ,
заместитель начальника
испытательного центра
Брестского государственного
технического университета

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ ПУСТОТНЫХ ПЛИТ БЕЗОПАЛУБОЧНОГО ФОРМОВАНИЯ В СООТВЕТСТВИИ С ТРЕБОВАНИЯМИ СТБ EN 1168:2005+A2:2009

SOME TEST RESULTS FOR CONTINUOUS PRE-STRESSED CONCRETE HOLLOW CORE SLABS IN ACCORDANCE WITH STB EN 1168:2005+A2:2009

В статье приведены результаты испытаний пустотных плит, изготовленных по технологии безопалубочного формования Weiler-Italia. Испытания проводились в соответствии с требованиями СТБ EN 1168:2005+A2:2009.

This article presents the test results for continuous pre-stressed concrete hollow core slabs produced according to the technology of Weiler-Italia. The tests were performed in accordance with STB EN 1168:2005+A2:2009.

ВВЕДЕНИЕ

Плиты пустотного настила безопалубочного формования (англ. Hollow-core slabs) получили широкое распространение в мировой строительной практике. Популярность таких элементов объясняется высоким качеством изделий во взаимосвязи с преимуществами технологии их изготовления (короткий производственно-технологический цикл при высоком уровне автоматизации). В последние годы производство и применение плит пустотного настила безопалубочного формования освоено рядом предприятий строительного комплекса Республики Беларусь.

Изготовление плит пустотного настила выполняют на длинных формовочных дорожках (стендах). Натяжение напрягающих элементов (канатов, проволоки) осуществляют механическим способом на всю длину станда, а формование изделия выполняют главным образом с помощью специальных формовочных агрегатов — так называемых слип-формеров (англ. *slip-former*) или экструдеров (англ. *extruder*).

Особенностью технологии безопалубочного формования является то, что в отличие от традиционной агрегатно-поточной технологии изготовления плит пустотного настила отсутствует возможность установки в вертикальные ребра изделия каркасов с поперечной арматурой, а в полки — сеток. По мнению ряда специа-

листов [1, 2], отсутствие поперечной арматуры в вертикальных ребрах плиты приводит к потенциальной угрозе хрупкого разрушения приопорных зон предварительно напряженных плит безопалубочного формования при действии перерезывающих сил.

В связи с названными обстоятельствами, специалистами ряда европейских исследовательских центров (VVT Building and Transport (Finland) [2], TNO (Netherland) [3], TU-Delft (Netherland [4], Universita dell' Aquila (Italy) [5], Istituto di Ricerche e Coll adi M. Masini (Italy) [6, 7]) в период с 1995 по 2005 гг. была реализована обширная программа испытаний, касающихся сопротивления срезу плит безопалубочного формования. Схемы испытаний (нагрузки), применявшиеся различными исследователями, приведены в таблице 1.

По результатам проведенных испытаний было сделано детальное обобщение, опубликованное в работах Rajari [2] и G. Bertagnoli, G. Mancini [1]. Главным заключением, сделанным из анализа результатов, явилось то, что расчетные зависимости, включенные как в национальные нормы проектирования ряда стран Европы, так и в единые нормы ТКП EN 1992-1 [8], применяемые для расчета предельных усилий среза в зонах, работающих без изгибных трещин нормального отрыва (формула (6.3) [8]), переоценивают фактическую несущую способность конструкции. Кроме того, было показано, что риск хрупкого разрушения сечений, наклонных

к продольной оси элемента, при уровнях нагружения, меньших, чем расчетные, выглядит реально возможным, представляя угрозу безопасности людей. Все это вызвало необходимость пересмотра как собственно расчетных моделей, применяемых для оценки сопротивления срезу пустотных плит безопалубочного формования, так и разработки унифицированных испытательных методов, закрепленных в единых европейских стандартах.

После опубликования результатов анализа [1, 2] в рамках комиссии № 5 (Prefabrication) Международной организации по бетону и железобетону (*fib*) начались согласования в европейском масштабе, явившиеся основой для принятия Европейским комитетом по нормированию (CEN) специального стандарта EN 1168:2005 [11], устанавливающего общие технические требования к пустотным плитам, главным образом к плитам безопалубочного формования. Помимо общих технических требований стандарт EN 1168:2005 [11] закрепил специфические расчетные процедуры для проектирования (расчетных проверок) пустотных плит безопалубочного формования. К сожалению, как свидетельствуют публикации ряда авторов [1, 2, 12], расчетные зависимости, внесенные для оценки сопротивления срезу элементов в зонах, работающих без изгибных трещин нормального отрыва, оказались не достаточно хорошо согласующимися с результатами последующих испытаний [1].

Материалы, представленные на конгрессе *fib* в Амстердаме (май 2008 г.), содержавшие предостережения относительно одной из основных частей стандарта — сопротивления срезу приопорных сечений, — явились импульсом к быстрой переработке и появлению измененной редакции СТБ EN 1168:2005+A2:2009 [10]. Обновленный стандарт EN 1168:2005 включает как новые, значительно более консервативные подходы к оценке сопротивления срезу, так и новую, по сравнению с версией 2005 г., процедуру проведения испытаний.

В 2010 г. новый стандарт СТБ EN 1168:2005+A2:2009 (IDT) [10] был введен на территории Республики Беларусь. Подобные действия, безусловно, являются верными и логичными, поскольку если технологии изготовления изделий соответствуют европейским стандартам, то и требования, которые следует предъявлять к готовым изделиям, долж-

Таблица 1. Схемы нагружения, применявшиеся при испытаниях пустотных плит безопалубочного формования (обобщение согласно [9])

Номер схемы	Схема нагружения
Согласно Pajari [2] CS = 3,48–5,70 м; h = 151–500 мм; L = 1,895–10,915 м; a = 375–1600 мм	
1	
2	
3	
4	
5	
6	
Согласно СТБ EN 1168:2005+A2:2009 [10]	
7	
8	

ны соответствовать аналогичным нормативно-техническим документам.

Кроме того, в настоящее время ряд предприятий строительного комплекса, производящих плиты пустотного настила по технологии безопалубочного формования, проходят процедуру оценки соответствия системы производственного контроля с целью получения права

нанесения на готовые изделия европейской маркировки (CE). Одним из важных этапов названной процедуры является проведение испытаний отобранных образцов плит по СТБ EN 1168 [10] и оценка их соответствия критериям, сформулированным в упомянутом стандарте.

Следует отметить, что для условий Республики Беларусь процедура испытаний по СТБ EN 1168 [10] является новой и кардинально отличается от требований ГОСТ 8829 [13]. Кроме того, изделия, производимые отечественными предприятиями, не в полной мере соответствуют общим техническим требованиям СТБ EN 1168, а главным образом двум положениям:

1) согласно требованиям п. 4.2.1.1.2 [10], плиты шириной более 1200 мм обязательно должны иметь арматуру, располагаемую в поперечном направлении. При этом арматура, располагаемая поперек плиты, должна иметь минимальный диаметр 5 мм и располагаться с шагом не более 500 мм. Применяемые технологии не позволяют реализовать данное требование для плит шириной 1500 мм;

2) согласно требованиям п. 4.2.1.2.1 [10], напрягающие элементы (канаты, проволоки) должны располагаться по ширине поперечного сечения плиты равномерно и симметрично. Вместе с тем, исходя из экономических соображений, при разработке чертежей типовых серий, принятых в Республике Беларусь, для ряда изделий было применено несимметричное расположение напрягающих канатов. Следует отметить, что в базах данных [7, 9], содержащих результаты испытаний пустотных плит, изготовленных по технологии безопалубочного формования в странах Европы, такие образцы не представлены. Наличие напрягающих элементов, имеющих несимметричное расположение в поперечном сечении плиты, может оказать влияние как на величину ожидаемых разрушающих нагрузок, учитываемых при проверках критериев соответствия, так и на фактическую форму разрушения плиты. Для таких элементов может потребоваться дополнительная корректировка расчетных моделей, применяемых при определении ожидаемых разрушающих усилий, используемых для оценки соответствия изделия по СТБ EN 1168.

1 ИСПЫТАНИЯ ПЛИТ ПУСТОТНОГО НАСТИЛА БЕЗОПАЛУБОЧНОГО ФОРМОВАНИЯ

В испытательном центре Брестского государственного технического университета (аттестат аккредитации ВУ/112 02.1.0.1048) были выполнены испытания пустотных плит, изготавливаемых по технологии безопалубочного формования Weiler-Italia. Испытания проводились в соответствии с требованиями СТБ EN 1168:2005+A2:2009 (IDT) [10]. Испытанию подвергали пустотные плиты ши-

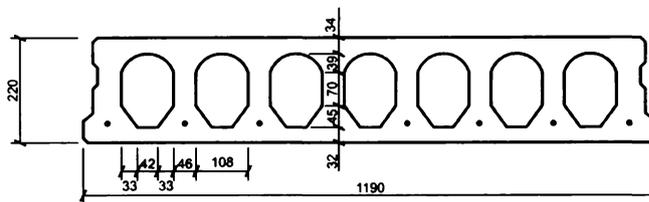


Рис. 1. Основные геометрические размеры сечения плит, подвергавшихся испытанию (по результатам фактических обмеров)

риной 1200 мм, имевшие несимметричное расположение напрягающих канатов по ширине сечения. Основные фактические геометрические размеры сечения плит показаны на рис. 1, а основные технические характеристики — в таблице 2.

1.1 Методика испытаний и критерии оценки соответствия по СТБ EN 1168:2005+A2:2009 [10]

Схема испытаний и детали испытательной установки показаны на рис. 2, а ее общий вид — на рис. 3.

В соответствии с требованиями СТБ EN 1168 [10] аппаратура, применявшаяся при испытаниях, соответствовала 3 классу точности по EN 12390-4:2000. Согласно J.3 СТБ EN 1168 [10], пролет испытываемых плит полной ширины должен составлять не менее 4,0 м и не менее 15h (что является большим) с точностью (± 100) мм. Учитывая, что все плиты, подвергавшиеся испытаниям, имели номинальную высоту сечения 220 мм, пролет был принят равным 4,0 м. При этом, по требованиям стандарта, испытаниям подвергали не менее трех образцов-аналогов. Учитывая, что все испытанные элементы имели длину более 4,0 м, на каждом из образцов выполняли два испытания (под одному испытанию для разных концевых участков плиты, что допускает СТБ EN 1168). В отличие от первой версии EN 1168 [11], новая процедура нагружения по версии 2009 года включала не десять, а два повторяющихся цикла.

Согласно СТБ EN 1168 [10], на первом цикле прикладывали нагрузку, равную 70 % от **расчетной** предельной нагрузки с точностью (-2%)-($+7\%$). На следующем цикле нагрузку прикладывали до достижения фактического предельного (разрушающего) усилия. Значение **расчетной** предельной нагрузки определяли при использовании в зависимостях теоретических расчетных моделей расчетных значений характеристик материалов (по действующим ТНПА), номинальных размеров сечения с учетом **наиболее неблагоприятной формы потенциального разрушения** (см. раздел 1.2).

В соответствии с требованиями СТБ EN 1168 [10] скорость нагружения не превышала следующих пределов:

Таблица 2. Основные технические характеристики пустотных плит, подвергавшихся испытаниям

Обозначение плиты	Основные размеры, мм			Армирование			Бетон
	h	b	L	Диаметр, мм Кол-во	f_{pk} , МПа	$\sigma_{pm,0}$, МПа	Средняя прочность на сжатие f_{cm} , МПа
П1/1-П3/2	220	1190	6300	$\frac{9}{7}$	1860	1050	48,2
Обозначения: f_{pk} — характеристическое значение временного сопротивления разрыву; $\sigma_{pm,0}$ — начальное напряжение в канате после натяжения; f_{cm} — средняя прочность бетона, определяемая по приближенной зависимости: $f_{cm} = 0,8f_{c,cube,m}$, где $f_{c,cube,m}$ — средняя прочность бетона, установленная испытанием образцов-кубов.							

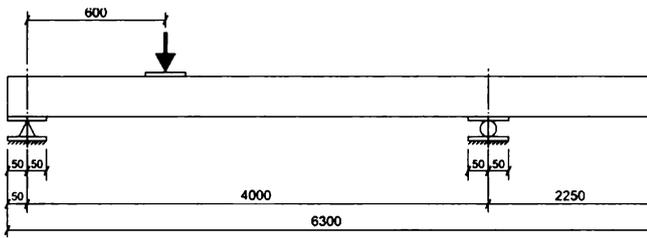


Рис. 2. Схема испытательной установки

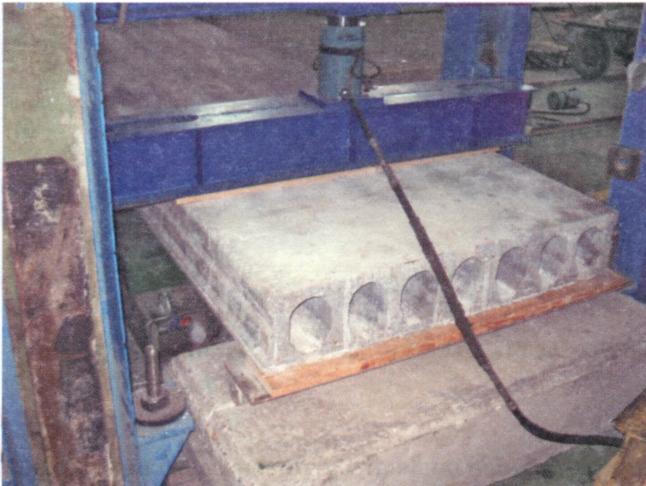


Рис. 3. Общий вид испытательной установки

— для первого цикла нагружения: два последовательных этапа нагружения в течение одной минуты каждый с последующей разгрузкой;

— для второго цикла нагружения:

а) первый этап составлял не более 50 % от рассчитанной **ожидаемой** предельной нагрузки и прикладывался не менее чем за одну минуту;

б) второй этап составлял не более 75 % от **ожидаемой** предельной нагрузки и прикладывался не менее чем за одну минуту;

в) последовательное повышение нагрузки со скоростью, не превышающей 10 % от рассчитанной ожидаемой предельной нагрузки в минуту. Так, например, если рассчитанная ожидаемая предельная нагрузка составляет 210 кН, скорость нагружения не должна была превышать 21 кН/мин.

Согласно СТБ EN 1168 [10], **ожидаемая** предельная нагрузка F_{calc} была определена с использованием расчетной модели для соответствующей формы разрушения, в которой применялись фактические прочностные характеристики напрягающих элементов и бетона, определенные по результатам испытаний (принимая $\alpha_{cc} = \alpha_{ct} = 1,0$ и $\gamma_c = \gamma_s = 1,0$), фактические геометрические размеры сечения плиты. При этом прочность бетона на растяжение может быть определена либо непосредственно из испытаний выпиленных кернов (по методике СТБ EN 1168), либо выведена из прочности на сжатие, определенной опытным путем*.

По результатам испытаний проверяется соответствие по следующим критериям:

* Согласно п. J.4 [10], прочность бетона на растяжение, принимаемая при расчете ожидаемой предельной нагрузки, может быть определена по формуле

$$f_{ct} = 0,8 f_{ctm}$$

где $f_{ctm} = 0,3 f_c^{2/3}$ — для бетонов классов менее C⁵⁰/₆₀;

$f_{ctm} = 2,12 \ln[1 + (f_c + 8)/10]$ — для бетонов классов более C⁵⁰/₆₀.

— критерий 1 (для каждого единичного испытания):

$$\frac{F_{test}}{F_{calc}} \geq 0,95, \quad (1)$$

— критерий 2 (для среднего): среднее отношение:

$$\left(\frac{F_{test}}{F_{calc}} \right)_m \geq 1,00. \quad (2)$$

При этом среднее отношение $(F_{test}/F_{calc})_m$ является средним значением, выведенным из отношений между единичными фактическими предельными нагрузками и соответствующими ожидаемыми предельными нагрузками для установленной формы разрушения.

В случае если полученные результаты не соответствуют установленным критериям, СТБ EN 1168 [10] рекомендует:

1) усовершенствовать технологию производства и повторить испытания;

2) скорректировать (привести в соответствие) расчетную модель, применяемую при проектировании элементов.

Следует отметить, что предложенные рекомендации могут быть исполнены производителем только частично (то, что касается совершенствования технологии производства). Приведение в соответствие расчетных моделей требует более глубокого анализа и, как минимум, репрезентативной выборки результатов испытаний. В этом случае, очевидно, можно воспользоваться для однотипных конструктивных элементов указаниями, содержащимися в СТБ EN 1990 [16], или методами, изложенными в Рекомендациях [14].

1.2 Возможные формы разрушения и соответствующие расчетные модели

При назначении контрольных испытательных нагрузок (расчетных и ожидаемых предельных нагрузок) следует совместно рассматривать следующие возможные формы разрушения предварительного напряженного элемента без поперечной арматуры в приопорной зоне при совместном действии изгибающих моментов, продольных и поперечных сил и соответствующие расчетные модели.

1. Сопротивление срезу для участка приопорной зоны плиты, работающего без изгибных трещин нормального отрыва (растягивающие напряжения от изгиба не превышают $f_{ctk,0,05}/\gamma_c$).

В соответствии с предложениями, сформулированными в работе [4], для расчета сопротивления срезу для плит безопалубочного формования в п. 4.3.3.2.2.1 СТБ EN 1168:2005+A.2:2009 [10] предложено общее выражение вида:

$$V_{rd,c} = \frac{J b_w(y)}{S_c(y)} \cdot \left[\sqrt{f_{ctd}^2 + \sigma_{cp}(y) \cdot f_{ctd}} - \tau_{cp}(y) \right], \quad (3)$$

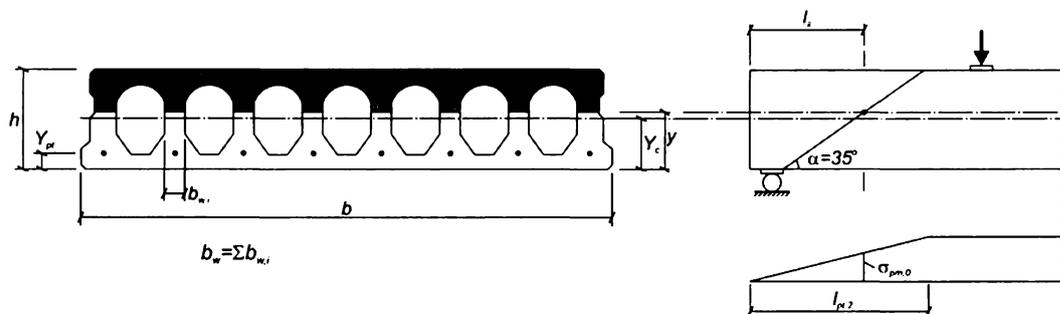


Рис. 4. К определению характеристик сечения по модели 1

$$\text{где } \sigma_{cp}(y) = \sum_{i=1}^n \left\{ \left[\frac{1}{A_i} + \frac{(Y_c - y) \cdot (Y_c - Y_{pt})}{J} \right] \cdot P_i(l_x) \right\} \cdot \frac{M_{Ed}}{J} \cdot (Y_c - y), \quad (4)$$

$$\tau_{cp}(y) = \frac{1}{b_w(y)} \sum_{i=1}^n \left\{ \left[\frac{A_c(y)}{A_i} - \frac{S_c(y)(Y_c - Y_{pt})}{J} + C_{pt}(y) \right] \cdot \frac{dP_i(l_x)}{dx} \right\}. \quad (5)$$

В формулах(3)–(5) приняты следующие обозначения (рис. 4):

J — момент инерции поперечного сечения;

$b_w(y)$ — ширина ребра (стенки) сечения плиты на высоте y ;

Y_c — ордината центра тяжести сечения;

$S_c(y)$ — статический момент площади сечения, располагаемого выше ординаты y относительно центральной оси;

y — расстояние до рассматриваемой критической точки на линии разрушения;

l_x — расстояние от рассматриваемой точки на линии разрушения до точки, соответствующей началу длины зоны передачи напряжений ($= x$);

$\sigma_{cp}(y)$ — напряжения сжатия в бетоне на уровне y на расстоянии l_x ;

n — число рядов напрягающих элементов в сечении;

A_i — площадь поперечного сечения плиты (допускается условного сечения);

$P_i(l_x)$ — усилие предварительного напряжения в рассматриваемом напрягающем элементе на длине l_x . Длину зоны передачи напряжений следует принимать по СНБ 5.03.01 [15] или в соответствии с п. 8.10.2.2 ТКП EN 1992-1 [8];

M_{Ed} — изгибающий момент, вызванный вертикальными нагрузками. Для расчетов допускается принимать $M_{Ed} = 0$;

$\tau_{cp}(y)$ — касательные напряжения на высоте y и расстоянии l_x , вызванные передачей усилия обжатия;

$A_c(y)$ — площадь сечения выше оси, проходящей на высоте y ;

$C_{pt}(y)$ — коэффициент, учитывающий положение рассматриваемого ряда напрягающих элементов, принимаемый:

$$C_{pt} = -1 \quad \text{— при } y \leq Y_{pt};$$

$$C_{pt} = 0 \quad \text{— при } y > Y_{pt};$$

Y_{pt} — ордината рассматриваемого ряда напрягающих элементов.

При применении расчетной модели (3) анализируемые сечения располагаются на линии разрушения, проведенной из точки, расположенной по обрезу опоры, под углом 35° к продольной оси элемента (см. рис. 4). Критическим считается вертикальное сечение, для которого значение поперечной силы $V_{Rd,c}$ будет наименьшим.

Как альтернатива выражению (3) может быть применена упрощенная зависимость, подобная выражению (6.3) ТКП EN 1992-1 [8] и СНБ 5.03.01 [15], но модифицированная для плит пустотного настила безопалубочного формирования с учетом работ [2, 4, 12]:

$$V_{Rd,c} = \varphi \cdot \frac{J b_w}{S} \cdot \sqrt{f_{ctd}^2 + \beta \alpha_1 \cdot \sigma_{cp} \cdot f_{ctd}}, \quad (6)$$

где J — момент инерции сечения;

S — статический момент площади сечения выше центральной оси, взятый относительно центральной оси;

$$\alpha_1 = l_x / l_{pt,2};$$

$l_{pt,2}$ — верхнее значение длины зоны передачи напряжений согласно СНБ 5.03.01 [15] и ТКП EN 1992-1 [8], равное $1,2l_{pt}$;

l_x — расстояние от торца элемента (начало длины зоны передачи напряжений) до рассматриваемого сечения;

σ_{cp} — напряжения в бетоне на уровне центральной оси; $\sigma_{cp} = N_{Ed}/A$;

φ — понижающий коэффициент для плит пустотного настила безопалубочного формирования; $\varphi = 0,8$;

β — понижающий коэффициент для плит пустотного настила безопалубочного формования, относящийся к длине зоны передачи напряжений (условия повышенного проскальзывания при вытягивании канатов); $\beta = 0,9$.

При использовании формулы (6) расчетное сечение располагается на расстоянии $0,5h$ от грани опоры (критическое сечение для среза располагается под углом 45°).

2. Сопротивление срезу для участка приопорной зоны, где образуются изгибные трещины нормального отрыва.

Для определения сопротивления срезу применяется зависимость вида:

$$V_{Rd,c} = [C_{Rd,c} \cdot K \cdot (100\rho_l \cdot f_{ck})^{1/3} + K_1 \cdot \sigma_{cp}] \cdot b_w \cdot d, \quad (7)$$

но не менее, чем:

$$V_{Rd,c} = (v_{min} + K_1 \cdot \sigma_{cp}) \cdot b_w \cdot d. \quad (8)$$

В формулах (7) и (8) приняты следующие обозначения:

$$K = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2,0, \quad (d \text{ в мм}); \quad (9)$$

$$\rho_l = \frac{A_{sl}}{b_w \cdot d} \leq 0,02; \quad (10)$$

$$\sigma_{cp} = \frac{N_{Ed}}{A_c} < 0,2f_{cd}, \quad (N_{Ed} > 0 \text{ — для сжатия}); \quad (11)$$

$$C_{Rd,c} = \frac{0,18}{\gamma_c};$$

$$K_1 = 0,15;$$

$$v_{min} = 0,035K^{3/2} \cdot f_{ck}^{1/2}. \quad (12)$$

3. Разрушение в результате потери анкеровки напрягающих элементов при образовании трещины нормального отрыва в пределах длины зоны передачи напряжений ($l_{pt,2}$).

Момент образования трещины может быть определен по упрощенной зависимости вида:

$$M_{crc} = W_{red} \left(\frac{P_t(l_x)}{A_{red}} + \frac{P_t(l_x) \cdot e_{op}}{W_{red}} + f_{ctm} \right), \quad (13)$$

где A_{red} , W_{red} — соответственно площадь и момент сопротивления для приведенного сечения;

e_{op} — эксцентриситет напрягающих элементов относительно центра тяжести приведенного сечения;

f_{ctm} — средняя прочность бетона при растяжении (компенсирует упругие характеристики сечения);

$P_t(l_x)$ — усилие в напрягающем элементе от начального натяжения с учетом потерь в расчетном сечении на расстоянии l_x от начала длины зоны передачи напряжений.

Для рассчитанного по формуле (13) значения момента M_{crc} определяется соответствующее значение перерезывающей силы и значение испытательной нагрузки.

4. Разрушение в результате того, что поперечная сила, соответствующая моменту трещинообразования вне зоны передачи напряжений, превышает предельную поперечную силу, рассчитанную по формуле (7) для участков приопорной зоны, работающих с трещинами нормального отрыва.

Фактическая предельная нагрузка, соответствующая разрушению испытываемого элемента, должна быть записана с идентификацией формы разрушения (срез по модели 1, срез по модели 2 с образованием трещин нормального отрыва, по модели 3 с потерей анкеровки напрягающих элементов, по модели 4).

В соответствии с J.5 [10] форма разрушения, наблюдаемая в испытаниях, должна соответствовать расчетной модели, принятой при расчете ожидаемых разрушающих нагрузок. Результаты испытаний следует сравнивать с расчетными значениями ожидаемых предельных нагрузок F_{calc} . Следует отметить, что ни одна из перечисленных расчетных моделей не учитывает (даже косвенно) возможность несимметричного размещения в сечении напрягающих элементов.

В таблице 3 представлены значения расчетных предельных и ожидаемых предельных нагрузок, соответствующих возможной форме разрушения плиты пустотного настила шириной 1,2 м, подвергавшихся испытаниям в соответствии с требованиями EN 1168 [11].

1.3 Результаты испытаний и их краткий анализ

Результаты испытаний плит, представленные в таблице 3, позволяют сделать следующие предварительные выводы.

1. Практически все испытанные плиты, несмотря на то, что они имели одинаковые геометрические характеристики, одинаковые армирование и прочность бетона (по данным лаборатории $f_{cm} = 48,2$ МПа), показали различные формы разрушения. При этом даже для единичной испытанной плиты формы разрушения, зафиксированные по ее левой и правой граням (таблица 4), отличались. Это создает неопределенности при выполнении оценки соответствия по СТБ EN 1168 [10]. Так, если принять в качестве ожидаемой разрушающей нагрузки минимальные значения для каждой из плит (см. таблицы 4, 5), то, за исключением плиты П2/1, для всех образцов критерии соответствия будут выполнены (см. таблицу 5).

Вместе с тем, обращают на себя внимание результаты испытания плиты П2/1, для которой было зафиксировано разрушение при образовании трещины, наклонной к продольной оси элемента без образования трещин нормального отрыва в зоне среза. При этом зафиксированная разрушающая нагрузка составила только 0,64 % от ожидаемой предельной нагрузки, установленной расчетом при фактических характеристиках плит. Для уточнения минимального значения предельной перерезывающей силы, воспринимаемой элементом, был выполнен перерасчет характерных сечений с шагом 10 мм по расчетной модели (3). Результаты расчета в виде графика, связывающего предельное значение перерезывающей силы и расстояние от опоры до рассматриваемого сечения, показаны на рис. 5.

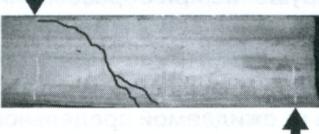
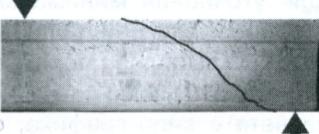
Как видно из графика (см. рис. 5), минимальное значение предельной перерезывающей силы составляет $V_{Rd,1(min)} = 184,93$ кН в сечении, расположенном на расстоянии 310 мм от опоры. Вместе с тем, и полученное

Таблица 3

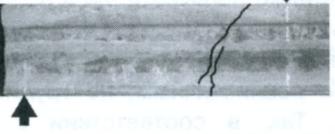
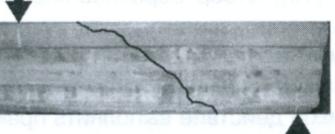
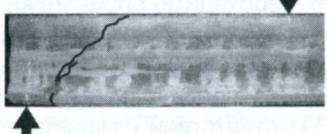
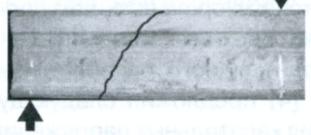
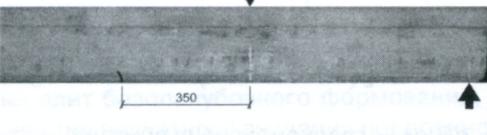
№ п/п	Возможная форма разрушения	Предельные значения перерезывающей силы, кН			Предельные значения нагрузки F , кН *	
		V_{Rd}	Расчетная	Ожидаемая	По расчетным значениям V_{Rd}	По ожидаемым значениям V_{Rd}
1	По наклонному сечению при отсутствии трещин нормального отрыва (по формуле (6.3) [8])	$V_{Rd,1}$	91,87	195,44	104,21	229,0
2	По наклонному сечению при образовании трещин нормального отрыва в зоне среза (по формуле (6.2а) [8])	$V_{Rd,2}$	63,43	73,47	69,95	82,04
3	Утрата анкеровки канатов при образовании нормальных трещин на длине зоны передачи напряжений	$V_{Rd,3}$	376,98	516,34	453,97	621,84
4	Образование трещин нормального отрыва вне зоны передачи напряжений, при этом $V_{Rd,4} > V_{Rd,2}$	$V_{Rd,4}$	99,09	112,0	119,34	134,89

* Предельные значения нагрузок F определены для схемы нагружения (см. рис. 2), применявшейся в испытаниях.
Примечание — Расчетные значения перерезывающих сил определены при расчетных значениях характеристик материалов и номинальных геометрических размерах плит, ожидаемые — при фактических характеристиках материалов и фактических геометрических размерах.

Таблица 4

Плита	Зафиксированная форма разрушения	Описание	Предельное усилие для соответствующей формы разрушения, кН	
			Ожидаемое F_{calc}	Фактическое F_{test}
П1/1		Левая: трещина нормального отрыва вне длины зоны передачи напряжений, $V_{Rd,4}$	134,89	135,0* 146,7
		Правая: наклонная трещина на участке без трещин нормального отрыва на расстоянии ≈ 120 мм от опоры, $V_{Rd,1}$	229,0	
П1/2		Левая: наклонная трещина на участке, имеющем трещины нормального отрыва, $V_{Rd,2}$	82,04	100,0 115,0
		Правая: наклонная трещина на участке, работающем без трещин нормального отрыва на расстоянии ≈ 350 мм от опоры, $V_{Rd,1}$	229,0	
П2/1		Левая: наклонная трещина для участка без трещин нормального отрыва, $V_{Rd,1}$	229,0	140,0 146,0
		Правая: наклонная трещина для участка без трещин нормального отрыва, $V_{Rd,1}$	229,0	

Окончание таблицы 4

Плита	Зафиксированная форма разрушения	Описание	Предельное усилие для соответствующей формы разрушения, кН	
			Ожидаемое F_{calc}	Фактическое F_{test}
П2/2		Левая: наклонная трещина для участка без трещин нормального отрыва, $V_{Rd,1}$	229,0	140,0 153,3
		Правая: наклонная на участке с изгибными трещинами нормального отрыва, $V_{Rd,2}$	82,04	
П3/1		Левая: наклонная трещина на участке без трещин нормального отрыва, $V_{Rd,1}$	229,0	126,7 130,0
		Правая: трещина нормального отрыва вне зоны передачи напряжений, $V_{Rd,3}$	134,89	
П3/2		Левая: наклонная на участке, имеющем трещины нормального отрыва, $V_{Rd,2}$	82,09	146,0 150,6
		Правая: трещина нормального отрыва на участке вне зоны передачи напряжений	134,89	

* В числителе нагрузка, соответствующая образованию трещин.

Таблица 5. Сравнение фактических разрушающих нагрузок и минимальных ожидаемых разрушающих нагрузок

№ п/п	$F_{calc,min}$, кН	F_{test} , кН	$\frac{F_{test}}{F_{calc,min}}$	Критерий 1	Среднее $\left(\frac{F_{test}}{F_{calc,min}}\right)_m$	Критерий 2
П1/1	134,89	146,7	1,088	Да	1,299	Да
П1/2	82,04	115,0	1,402	Да		
П2/1	229,0	146,0	0,638	Нет		
П2/2	82,04	153,3	1,869	Да		
П3/1	134,89	130,0	0,964	Да		
П3/2	82,04	150,6	1,836	Да		

уточненное значение существенно отличается от фактического значения, полученного в испытаниях.

Отсюда очевиден еще один вывод.

2. Расчетная модель (см. формулы (3) и (6)), применяемая для определения ожидаемых предельных перерезывающих сил на участках, работающих без изгибных трещин, не в полной мере учитывает особенности работы плит пустотного настила безопалубочного формования,

в частности при несимметричном и неравномерном распределении в сечении элемента напрягающих канатов.

Как было показано ранее, анализ результатов испытаний пустотных плит безопалубочного формования, представленный в работах [1, 2, 9, 12], потребовал корректировки зависимостей ТКП EN 1992-1 [8] (в частности формула (6.3)) путем введения в СТБ EN 1168:2005+A2:2009 [10]

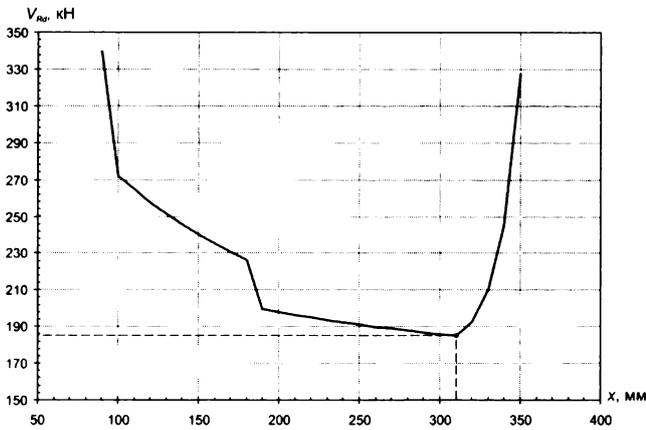


Рис. 5. Зависимость сопротивления элемента срезу от положения расчетного сечения

понижающих коэффициентов $\varphi = 0,8$ и $\beta = 0,9$. Однако эти корректировки не учитывают то обстоятельство, что в соответствии с типовыми сериями, действующими в Республике Беларусь, напрягающие канаты могут располагаться несимметрично и неравномерно по сечению. В результате применения такого конструктивного решения компоненты плиты пустотного настила, представляющей собой комбинацию коробчатых элементов с тонкими стенками, получают при передаче усилия обжатия на стадии изготовления сложное напряженно-деформированное состояние, неоднозначно влияющее на работу плиты при нагружении, особенно в зоне среза. В этой ситуации следует либо выполнить дальнейшую корректировку расчетной модели (см. формулы (3) или (6)), либо отказаться от неравномерного и несимметричного расположения напрягающих элементов по сечению. Однако переработка рабочих чертежей типовых серий является довольно трудоемким процессом, требующим затрат времени.

Следует отметить, что расчетная модель сопротивления срезу, в частности для участков элемента, работающих без трещин нормального отрыва, является очень чувствительной к вариациям прочности бетона на растяжение. При расчете ожидаемых значений предельных усилий необходимо использовать фактические (не номинальные) значения как геометрических параметров, так и прочностных характеристик материалов. В соответствии с приложением J СТБ EN 1168 [10] фактические прочностные характеристики бетона могут быть получены двумя способами:

1) испытанием образцов-кернов, отобранных из фрагмента плиты длиной (200 ± 5) мм, вырезанного из отформованной дорожки, располагаемого в непосредственной близости к испытываемой плите. В этом случае прочность на сжатие f_c определяют нагружением цилиндров, а прочность на растяжение — раскалыванием цилиндров;

2) испытанием образцов-кубов или цилиндров, изготовленных в процессе формовки и хранившихся в условиях, соответствующих условиям хранения плит. Переход к прочности на растяжение осуществляется либо расчетным путем, как это было показано ранее, либо, как и в первом случае, раскалыванием цилиндров.

В условиях производства для контроля прочности бетона используют главным образом образцы-кубы, отформованные из бетонной смеси, поступающей в раздаточные бункеры. При формовании с использованием так называемых слип-формеров такой вид контроля прочности бетона не является вполне адекватным, так

как относится, по существу, к контролю прогнозируемых прочностных характеристик исходной бетонной смеси, поступающей в формовочный агрегат. В процессе формования дорожки по двухстадийной технологии в бетонную смесь вводится дополнительное количество воды, распыляемой из форсунок. В силу этого, характеристики бетона могут изменяться по отношению к базовому свойству не только по высоте, но и по ширине и длине формируемого изделия. С другой стороны, отбор кернов непосредственно из отформованной плиты хотя и выглядит более реалистичным, но трудно выполняется практически. Так, в соответствии с требованиями СТБ EN 1168 [10], отбор образцов-кернов (как правило, $\varnothing 50$ мм) следует производить в месте пересечения стенки и нижней полки плиты, в которой размещены напрягающие элементы. При наличии напрягающего каната в каждом ребре такое действие выполнить практически невозможно. Вырезание кернов диаметром менее 50 мм вносит существенные погрешности в результаты испытаний.

В меньшей степени подобным неопределенностям, связанным с оценением прочности бетона, подвержены плиты, изготавливаемые по технологии экструзионного формования, обеспечивающей более равномерные свойства бетона по сечению элемента.

Кроме того, необходимо обратить внимание на особенности сопротивления срезу коробчатых сечений (кстати, по сути, являются пустотные плиты безопалубочного формования) с предварительно напряженной нижней полкой. В соответствии с моделью, предложенной Yang [4] (рис. 6), при передаче усилия обжатия нижняя полка стремится к укорочению, чему препятствует объединенная с ней верхняя часть плиты.

В случае однорядного расположения напрягающих канатов, Yang [4] предложил следующую зависимость для вычисления касательных напряжений, действующих в стенке плиты:

$$\tau = \frac{1}{b_w} \cdot \left[\left(\frac{A_{cp} \cdot S_{cp} \cdot e}{A} \right) \cdot \frac{dP}{dx} + \frac{S_{cp}}{J} \cdot V_{Ed} \right], \quad (14)$$

где dP/dx — градиент усилия обжатия;
 e — эксцентриситет усилия обжатия;
 A_{cp}, S_{cp} — соответственно площадь и момент сопротивления сечения, располагаемого выше рассматриваемой оси плиты (рис. 7).

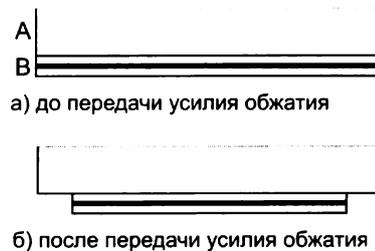


Рис. 6. Иллюстрация к модели Yang [4]

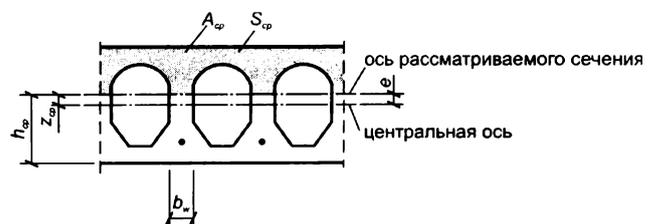


Рис. 7. Основные характеристики сечения по модели [4]

Полученная зависимость была использована в уточненной расчетной модели (см. формулу (3)), внесенной в СТБ EN 1168 [10].

Однако, несмотря на введенные уточнения, расчетная модель базируется на целом ряде допущений, основным из которых является допущение о равномерном распределении напряжений по высоте зоны среза. Можно предположить, что в случае пустотных плит с тонкими стенками такое допущение может привести к значительным погрешностям в результатах расчетов сопротивления срезу, в частности для элементов, имеющих несимметричное расположение напрягающих канатов.

Для того чтобы оценить результаты приведенных испытаний и определить минимальные значения предельных перерезывающих сил, соответствующих принятому в действующих ТНПА [8, 15] уровню надежности, может быть применена методика, изложенная в приложении D к СТБ EN 1990 [16]. В соответствии с D.7.3 расчетное значение сопротивления плиты пустотного настила для подтверждения несущей способности следует определять по формуле

$$V_{Rd} = \eta_d \cdot V_{0,d} = \eta_d \cdot m_x \cdot (1 - K_{d,n} \cdot V_x), \quad (15)$$

где $V_x = S_m/m_x$ при $S_m^2 = \frac{1}{n-1} \cdot (x_i - m_x)^2$;

$K_{d,n}$ — коэффициент, определяемый по таблице D.2 приложения D СТБ EN 1990 [16]. Для $n = 6$ $K_{d,n} = 6,38$ (при неизвестном значении V_x);

η_d — коэффициент преобразования, учитывающий погрешности, не охваченные самими испытаниями, $\eta_d = 1,0$;

m_x — среднее значение из результатов испытаний (F_m).

Тогда для условий выполненных испытаний расчетное значение перерезывающей силы $V_{Rd,min}$ для подтверждения несущей способности плит шириной 1200 мм, армированных семипроволочными канатами $\varnothing_{nom} = 9$ мм, составит:

$$V_{Rd,min} = 121,84 \cdot (1 - 6,38 \cdot 0,1) = 43,46 \text{ кН}. \quad (16)$$

Оценка результатов испытаний может быть выполнена и с использованием Байесовского метода, изложенного в Рекомендациях [14], применительно к прямому установлению расчетных значений. Для условий выполненных испытаний среднее значение $V_{Rd} = 121,84$ кН; среднеквадратичное отклонение $S_x = 12,29$ кН; коэффициент вариации $V_x = 0,1$. Для индекса надежности $\beta_R = 3,09$ по таблице 7 [14] $t_v = 5,89$ при числе степеней свободы $\nu = 5,00$.

$$V_{Rd,min} = F_m \cdot \left(1 - t_v \cdot V_x \cdot \sqrt{\frac{n+1}{n}} \right) = 121,84 \cdot \left(1 - 5,89 \cdot 0,1 \cdot \sqrt{\frac{6+1}{6}} \right) = 43,68 \text{ кН}. \quad (17)$$

Как видно, расчеты по обоим документам дают практически аналогичный результат. Таким образом, для испытанных плит безопалубочного формования, имеющих несимметричное расположение напрягающих канатов, в качестве расчетного значения поперечной силы для подтверждения несущей способности следует принять $V_{Rd} = 43,46$ кН. Полученный результат, безусловно, может быть уточнен при увеличении объема используемой при анализе выборки результатов испытаний.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные в соответствии с требованиями СТБ EN 1168:2005+A2:2009 [10] испытания пустотных плит безопалубочного формования шириной 1200 мм с несимметричным расположением напрягающих элементов позволяют сделать следующие основные выводы.

- 1 Установлены различия в форме разрушения приопорной зоны однотипных плит, что создает неопределенность при проведении оценки по критериям соответствия, приведенным в СТБ EN 1168 [10]. Расчетные модели, применяемые для оценки предельных ожидаемых усилий в случае разрушения диагонального сечения без образования трещин нормального отрыва, требуют дальнейшей корректировки с учетом сложного напряженно-деформированного состояния компонента коробчатого сечения пустотной плиты как на стадии передачи усилия обжатия, так и при нагружении. В качестве мероприятия, смягчающего неблагоприятные формы разрушения, может быть рекомендовано выполнение требования п. 4.2.1.2 СТБ EN 1168 [10], касающегося равномерного и симметричного размещения напрягающих элементов в поперечном сечении.
- 2 Как отмечается в работах [9] и МС 2010 [17], при проектировании следует проверять все возможные формы разрушения, применяя соответствующие расчетные модели. В качестве расчетного следует принимать минимальное значение из полученных расчетных усилий.
- 3 Следует продолжить испытания пустотных плит безопалубочного формования, производимых предприятиями строительного комплекса Республики Беларусь. Оценка результатов испытаний и получение критериальных значений ожидаемых предельных нагрузок могут быть выполнены на данном этапе, пользуясь Рекомендациями [14].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bertagnoli, G. Failure analysis of hollow-core slabs tested in shear / G. Bertagnoli, G. Mancini // *Structural Concrete*. — 2009. — № 3. — P. 139–143.
2. Pajari, M. Resistance of Prestressed Hollow-Core Slabs Against Web Shear Failure. ESPOO, Finland, 2005, VTT Research Notes 2292.
3. TNO Building and Constructions Research. TNO Report: Standard Shear Test on Prestressed Hollow-Core Slabs according to EN 1168. TNO Building and Constructions Research, The Netherlands, 2005.
4. Yang, L. Design of prestressed hollow-core slabs with reference to web shear failure / L. Yang // *Journal of Structural Engineering*. — 1994. — № 9(120). — P. 2675–2696.
5. Dipartimento di Ingegneria delle Strutture delle Acque e del Terreno. Dipartimento di Ingegneria delle Strutture delle Acque e del Terreno, Università degli Studi di l'Aquila: Prove di carico statico su solai alveolari Spiroll. Report of Generale Prefabricati, December 1998, June 2003, December 2003.
6. Istituto di Ricerche e Collaudi M. Mancini. Rapporto di prova no. 5386, 12 July, 1995.
7. Istituto di Ricerche e Collaudi Mancini. Prove di Carico su lastre RAP200 — Rapporto di prove 1471 — 2005, 28 February, 2005.
8. EUROCODE 2: Design of concrete structures — Part 1: General Rules and Rules for Building. — Brussels — 2001 (Проектирование железобетонных конструкций — Часть 1: Общие правила и правила для зданий): ТКП EN 1992-1-1:2004. — October, 2002. — 230 p.
9. Ajdukewicz, A. Scinanie sprezonych plyt kanalowych normowych / A. Ajdukewicz, A. Kliszczewicz // *Inzynierija I Budownictwo*. — 2010. — № 5–6. — P. 254–259.
10. Изделия железобетонные сборные. Плиты многопустотные: СТБ EN 1168:2005+A2:2009 (E. IDT).
11. Изделия железобетонные сборные. Плиты многопустотные: EN 1168:2005.
12. Palermo, A., Della Bella M. Reliability of shear strength expressions for hollow core slabs. *Studi e Recerche*, 2007, 27. — P. 1–47.
13. Изделия строительные железобетонные и бетонные заводского изготовления. Методы испытаний нагружением. Правила оценки прочности, жесткости и трещиностойкости: ГОСТ 8829-94. — Введ. 01.01.1998.
14. Рекомендации по оценке прочности, жесткости и трещиностойкости сборных бетонных и железобетонных изделий, периодичности их испытаний нагружением и применению методов неразрушающего контроля прочности: Р1.03.042.07. — Брест, 2010. — 48 с.
15. Бетонные и железобетонные конструкции: СНБ 5.03.01-02. — Введ. 01.07.2003.
16. EUROCODE: Basis of Structural Design (Основы проектирования конструкций): СТБ EN 1990:2009.
17. Model Code 2010/ First Total Draft — **fib** — 2010. Part II.