

УДК 624.012.4-183.4; 624.94.014.2

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛИТ
ИЗ ПЕНОБЕТОНА И ТОНКОСТЕННОГО СТАЛЬНОГО
ХОЛОДНОДЕФОРМИРОВАННОГО ОЦИНКОВАННОГО ПРОФИЛЯ**

*канд. техн. наук, доц. А.П. КРЕМНЁВ;
канд. техн. наук, доц. Е.Г. КРЕМНЁВА; Р.А. РАДКЕВИЧ
(Полоцкий государственный университет)*

Рассматривается конструкция опытных образцов из пенобетона и тонкостенного стального холоднодеформированного оцинкованного профиля. Определена прочность конструкций. Показана картина трещинообразования; представлены графики деформаций сжатой зоны и прогибов опытных образцов, а также построенные эпюры деформаций сжатой и растянутой зоны тонкостенного стального холоднодеформированного оцинкованного профиля. Установлен факт совместной работы пенобетона и стального профиля в конструкции.

Ключевые слова: *пенобетон, тонкостенный стальной холоднодеформированный профиль, совместная работа, деформации, трещинообразование и прочность конструкции.*

На современном этапе развития народного хозяйства инновационные технологии используются во всех его отраслях, в том числе и в строительной отрасли. Возводить здания и сооружения можно гораздо быстрее и дешевле благодаря быстровозводимым конструкциям. Подобные здания и сооружения строятся в сжатые сроки с минимальными трудозатратами [1; 2]. При этом элементы имеют меньший вес, стоимость изготовления и время монтажа при сохранении прежней несущей способности и эксплуатационных качеств [3].

К наиболее легким и быстровозводимым можно отнести легкие стальные тонкостенные конструкции (ЛСТК), обладающие таким важным достоинством, как индустриальность [4]. Каркасы зданий поставляются на строительную площадку в виде готовых к монтажу наборов промаркированных деталей и элементов. Конструкции из тонкостенных каркасов имеют небольшой вес, что позволяет производить их монтаж без использования дорогостоящей грузоподъемной техники. Кроме того, существенно снижается нагрузка на фундаменты. Данные преимущества легких конструкций в наибольшей степени проявляются при реконструкции зданий и сооружений с целью надстройки дополнительных этажей. Стоит также отметить, что здания или сооружения, построенные из ЛСТК, практически не имеют строительных отходов. При строительстве используются гипоаллергенные материалы, которые безопасны для здоровья человека и окружающей среды [2; 5–7].

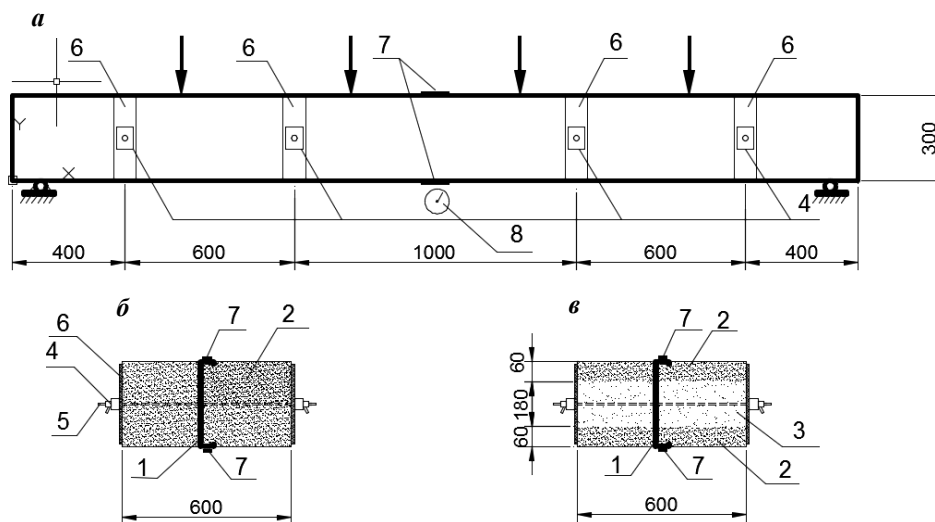
В качестве утеплителя для систем ЛСТК используются минераловатные, базальтовые маты и плиты, стекловата, эковата и другие волокнистые изоляционные материалы [7]. Широкое распространение при возведении ЛСТК получил пенобетон, который представляет собой легкий пористый искусственный каменный материал на цементном вяжущем. Монолитный пенобетон не горюч и может применяться в огнезащитных конструкциях, обладает хорошими теплоизоляционными свойствами, долговечен, считается недорогим материалом; при заливке надежно заполняет опалубку любой формы, не оставляя раковин, каверн и пустот [8]. Данные качества пенобетона идеально подходят и для частного, и для коммерческого домостроения [9].

Как показал обзор технической литературы, наибольшее применение ЛСТК и пенобетон нашли при возведении ограждающих конструкций. В несущих изгибаемых конструкциях, таких как балки, плиты покрытия и перекрытия, ЛСТК и пенобетон на данный момент массового применения пока не имеют. Это связано с тем, что на современном этапе существующие методики расчета изгибаемых конструкций из тонких стальных профилей с заполнением легким пенобетоном не позволяют с достаточной степенью достоверности оценить их несущую способность и деформативность [10]. Для скорейшего решения данной проблемы необходимо проведение всесторонних научно-теоретических и экспериментальных исследований.

Подобного рода исследования проводятся в России, Украине, Польше [2; 6; 7]. Белорусскими учеными также выполняются научные работы с применением легких бетонов и конструкций. Так, в Полоцком государственном университете были проведены экспериментально-теоретические исследования несущей способности монолитных плит перекрытий с применением тонкостенных стальных холоднодеформированных оцинкованных профилей с пенобетонным заполнением. Основная задача исследований заключалась в оценке степени влияния пенобетонного заполнения на несущую способность металлических профилей при действии изгибающего момента.

Для проведения эксперимента были изготовлены два опытных образца (плита П-I и плита П-II), отличающихся плотностью пенобетона. Оба образца выполнены с применением одинакового С-образного холоднодеформированного оцинкованного профиля высотой 300 мм (С300), который устанавливался по центру образца. Размеры образцов составляли 300×600×3000 мм. Для моделирования эффекта сплошной монолитной плиты испытываемые образцы обжимались при помощи пружинных зажимов, которые плотно крепились на боковых гранях плит через деревянные подкладки.

Плита П-I изготовлена с применением пенобетона плотностью 500 кг/м³ (D500); плита П-II – с применением двух видов пенобетона D200 в средней части и D500 в сжатой и растянутой зонах. Конструкция опытных образцов и схема приложения нагрузки показаны на рисунке 1.



a – общий вид; *б* – сечение образца плиты П-I; *в* – сечение образца плиты П-II;

1 – профиль С300; 2 – пенобетон D500; 3 – пенобетон D200; 4 – пружинный зажим; 5 – стяжной металлический прут d8; 6 – деревянная подкладка; 7 – тензодатчики; 8 – прогибомер

Рисунок 1. – Конструкция опытных образцов

Испытание опытных образцов проводилось по балочной схеме с приложением сосредоточенных усилий в четырех точках. Нагрузку прикладывали ступенями, каждая из которых не превышала 1/15 предполагаемой расчетной разрушающей нагрузки с выдержкой на этапе 10 минут. В процессе испытания измеряли деформации стальных тонкостенных профилей, прогибы конструкции, ширину раскрытия трещин и их развитие по высоте сечения плиты вплоть до разрушения [11]. Общий вид стенда для испытания плит показан на рисунке 2.



Рисунок 2. – Общий вид стенда для испытания плит

Продольные деформации крайнего волокна сжатой и растянутой зоны профиля измерялись при помощи измерительного комплекса ТЕРЕМ-4. Датчики с базой 120 мм были установлены по центру тонко-

стенного стального холоднодеформированного оцинкованного профиля. Прогибы конструкции измерялись прогибомером 6ПАО с ценой деления 0,01 мм. Ширина раскрытия трещин фиксировалась микроскопом МПБ-2 с 25-ти кратным увеличением и ценой деления 0,05 мм. Деформации и прогибы конструкции измерялись вплоть до исчерпания несущей способности. При этом непосредственно перед разрушением приращение нагрузки на этапах были минимально возможными.

Общий вид плит после исчерпания несущей способности приведен на рисунке 3. В процессе нагружения плиты П-I наблюдалось образование как нормальных, так и наклонных трещин. При нагружении плиты П-II также появлялись трещины, в основном наклонные.

a*б*

a – плита П-I; *б* – плита П-II

Рисунок 3. – Общий вид образцов плит после испытания

Анализ деформаций сжатой и растянутой зоны металлического профиля позволяет сделать вывод о характере взаимодействия металлической балки и пенобетонного заполнителя (рисунок 4).

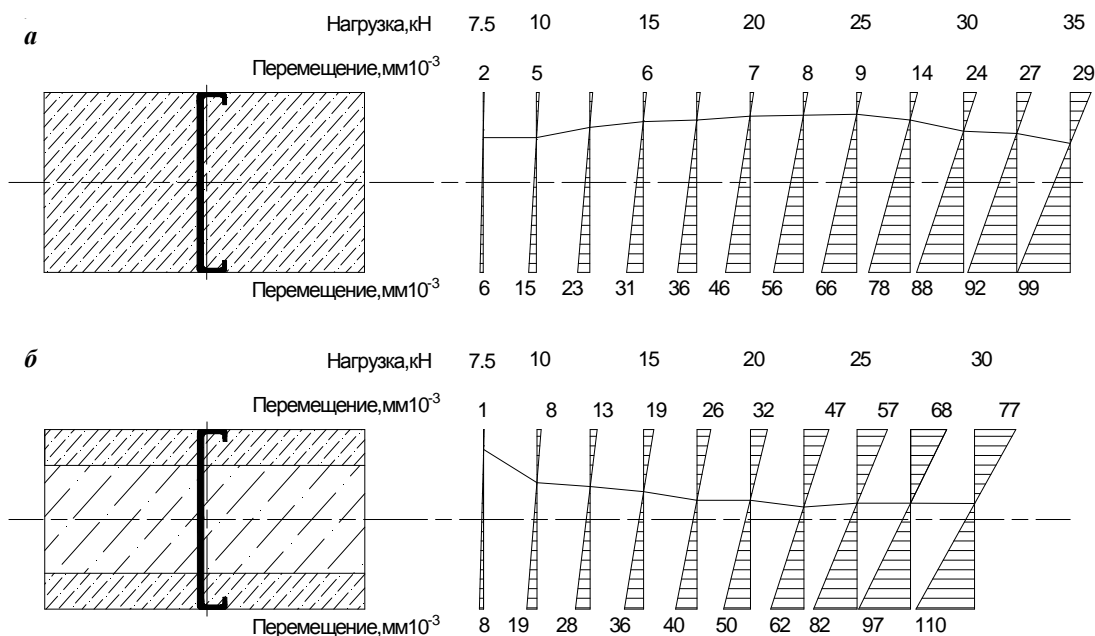


Рисунок 4. – Эпюры деформаций для плиты П-I (*a*); для плиты П-II (*б*)

По мере увеличения нагрузки положение нейтральной оси в образце плиты П-I (рисунок 4, *a*) заметно изменялось. На начальном этапе (до нагрузки 10 кН) деформации растяжения нижних волокон стального профиля превышали деформации сжатия верхних волокон практически в три раза. На этапах загрузки от 10 до 25 кН положение нейтральной оси постепенно перемещалось в сжатую зону, а пре-

вышение деформаций растяжения над деформациями сжатия составило более 7 раз. Такое распределение деформаций по сечению испытываемого образца явно свидетельствует о совместной работе металлического профиля и пенобетона. Как и в традиционных железобетонных конструкциях, в данном образце плиты деформации растяжения воспринимаются металлом профиля, а деформации сжатия – бетоном.

Иная схема распределения деформаций зафиксирована при испытании плиты П-II. Лишь на самом первом этапе загрузки (до нагрузки 10 кН) можно отметить признаки совместной работы монолитного бетона и стального профиля. При дальнейшем увеличении нагрузки положение нейтральной оси все больше смещалось к середине сечения плиты, соответствующей геометрической оси стального профиля. Однако при нагрузке 20 кН и выше положение нейтральной оси практически не изменялось, как не изменялось и при изгибе обычных металлических балок.

На рисунке 5 показаны графики изменения деформаций сжатой зоны стального профиля с ростом нагрузки. На приведенных графиках следует выделить следующие характерные участки: 1 – практически вертикальные участки на самом начальном этапе загрузки; 2 – практически линейный участок до нагрузки 25 кН (только для плиты П-I); 3 – более пологие участки.

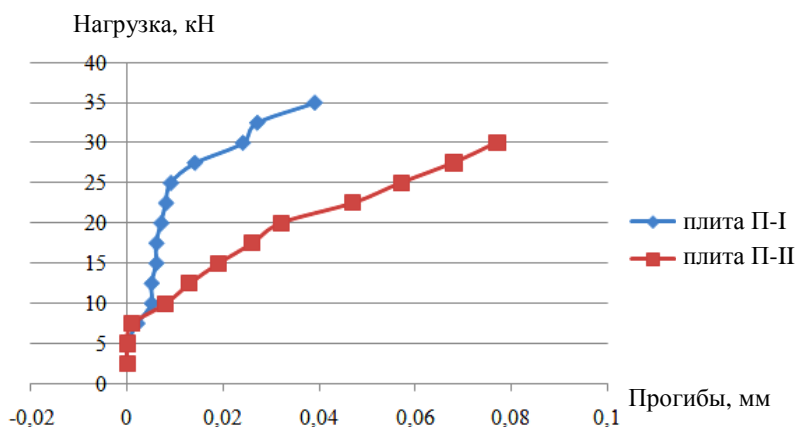


Рисунок 5. – Сравнение деформаций сжатой зоны

Сопоставление полученных данных с характером трещинообразования позволяет сделать вывод о том, что участок 1 соответствует работе плит без трещин, участок 2 – работе плиты с развитием нормальных трещин в пролете. Участок 3 характеризуется нелинейным, скачкообразным развитием сжимающих деформаций верхних волокон профиля. При этом в бетоне плиты зафиксировано интенсивное развитие наклонных трещин. На графике для плиты П-II участок 2 практически отсутствует. При испытании плиты П-II наклонные трещины стали появляться практически на начальном этапе загрузки. Прогибы плиты I и плиты II показаны на рисунке 6.

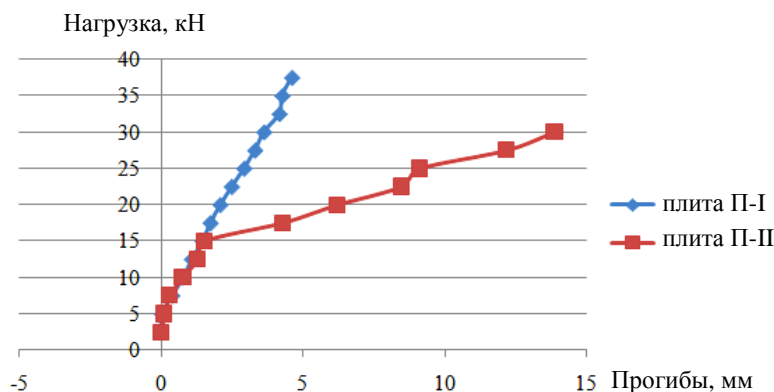


Рисунок 6. – Сравнение прогибов плиты П-I и плиты П-II

Нагрузка при испытаниях плит доводилась до значений, при которых происходило полное разрушение плит. Для плиты П-I разрушающая нагрузка составила 62,5 кН, для плиты П-II – 30 кН. Разрушение образцов в обоих случаях происходило вследствие потери устойчивости стенок и полок стального профиля на опорах.

Описанное выше разрушение плит сопровождалось образованием значительных наклонных трещин, раздроблением бетона в опорной зоне (рисунок 7).



а

б

а – потеря устойчивости стенок и полок стального профиля;
б – образование значительных наклонных трещин и раздробление бетона

Рисунок 7. – Характер разрушения образцов в опорной зоне

Анализ полученных в ходе экспериментальных исследований данных позволяет сделать вывод, что совместная работа стальных холоднодеформированных оцинкованных профилей и заполнителя из легкого бетона зафиксирована только для образца с пенобетоном марки по плотности D500. В данном случае характер развития деформаций в сжатой и растянутой зонах, схема раскрытия трещин соответствуют работе изгибаемых железобетонных элементов с традиционным армированием.

В образце плиты с заполнением пенобетоном различной плотности (D200 и D500, плита П-II) характер развития деформации сжатой и растянутой зон в целом соответствовал работе металлической балке без заполнения. В данном случае совместная работа профиля и заполнителя из легкого бетона зафиксирована лишь на начальных этапах загрузки. В то же время следует отметить, что пенобетонный заполнитель сыграл существенную роль в обеспечении общей устойчивости тонкостенного профиля, работающего на изгиб. В процессе испытаний плиты П-II вертикальность стенки балки в пролете сохранялась до самого момента разрушения. Потери местной устойчивости полок балки в местах приложения сосредоточенных сил в пролете также зафиксировано не было.

Таким образом, подводя итоги проведенного научного исследования, можно сделать следующие **выводы:**

- 1) применение легких бетонов (пенобетона) в качестве заполнителя конструкций перекрытия, выполненных с применением стальных холоднодеформированных оцинкованных профилей, позволяет существенно повысить их несущую способность;
- 2) при плотности пенобетона D500 совместная работа заполнителя и стальных профилей обеспечивалась практически до момента разрушения образца;
- 3) разрушение образцов в обоих случаях происходило за счет местной потери устойчивости металлического профиля в опорных зонах, сопровождающейся образованием значительных наклонных трещин и раздроблением бетонного заполнителя;
- 4) разрушающая нагрузка для плиты П-I (D500) составила 62,5 кН, для плиты П-II – 30 кН. Существенная разница в значениях разрушающей нагрузки объясняется тем, что в плите П-II с пенобетоном меньшей плотности (D200 в середине сечения и D500 по краям) не удалось обеспечить совместную работу бетонного заполнителя и стального профиля;
- 5) потеря общей устойчивости тонких стальных профилей и местная потеря устойчивости полок в местах приложения сосредоточенных нагрузок в пролете не были зафиксированы как при испытании плиты П-I, так и при испытании плиты П-II.

ЛИТЕРАТУРА

1. Быстровозводимые здания: основные преимущества и недостатки [Электронный ресурс] // Все просто : журнал. – Режим доступа: <http://vseprostoy.ru/byistrovozvodimyye-zdaniya-osnovnyie-preimushhestva-i-nedostatki/>. – Дата доступа: 02.10.2017.

2. Пинскер, В.А. СТО 82866678-3.01.01-2013 / В.А. Пинскер, В.П. Вылегжанин, Н.О. Куликова. – СПб. : АНДРОМЕТА. – 2013. – 8 с.
3. Вербицкий, И.О. Применение металлического профилированного листа в качестве несущего элемента монолитных перекрытий из пенобетона / И.О. Вербицкий // Ползуновский альманах. – 2016. – № 1. – С. 55–58.
4. Быстровозводимые промышленные здания [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.dvutavr.com.ua/bmz/promyishlennyye-zdaniya>. – Дата доступа: 14.10.2017.
5. Легкие стальные тонкостенные конструкции (ЛСТК): описание, плюсы и минусы, технология строительства [Электронный ресурс] / А. Кирницкая. – Режим доступа: <https://www.syl.ru/article/328996/legkie-stalnyie-tonkostennyye-konstruktsii-lstk-opisanie-plyusy-i-minusyi-tehnologiya-stroitelstva>. – Дата доступа: 28.11.2017.
6. Бронзова, М.К. Конструкция каркасных зданий с применением монолитного пенобетона / М.К. Бронзова, Н.И. Ватин, М.Р. Гарифуллин. – СПб. : С.-Петербург. политехн. ун-т // Сборник. Строительство уникальных зданий и сооружений, 2015. – 77 с.
7. Калафат, К. Противопожарное проектирование легких стальных тонкостенных конструкций / К. Калафат, Л. Вахитова. – Киев : Украинский центр стального строительства. – 19 с.
8. Лундышев, И.А. Почему пенобетон [Электронный ресурс] / И.А. Лундышев. – Режим доступа: http://www.sovbi.ru/ru/penobeton/why_penobeton.php. – Дата доступа: 29.11.2017.
9. ЛСТК и монолитный пенобетон [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.profstaldom.ru/lstk-articles/lstk-i-monolitnyj-penobeton/>. – Дата доступа: 15.12.2017.
10. Рыбаков, В.А. Основы строительной механики легких стальных тонкостенных конструкций / В.А. Рыбаков. – СПб. : С.-Петербург. политехн. ун-т, 2011. – 7 с.
11. Изделия строительные железобетонные и бетонные заводского изготовления. Методы испытаний нагружением. Правила оценки прочности, жесткости и трещиностойкости : ГОСТ 8829-94. – Взамен ГОСТ 8829-85 ; введ.01.01.98. – М. : МНТКС, 1998. – 19 с.

Поступила 15.10.2018

EXPERIMENTAL AND THEORETICAL RESEARCHES OF THE PLATES MADE OF FOAM CONCRETE AND OF THE THIN-WALLED STEEL COLD-FORMED GALVANIZED SECTION

A. KREMNEV, E. KREMNEVA, R. RADKEVICH

The structure of foam concrete and of the thin-walled steel cold-formed galvanized section prototypes is considered. Structural strength is determined. The picture of crack formation, the graphics of the compressed zone deformations, as well as experimental prototypes deflections are shown. The diagrams of deformations of the compression and tensile zones of the thin-walled steel cold-formed galvanized section are made. The fact of foam concrete and the steel section cooperation in the structure is established.

Keywords: *foam concrete, thin-walled steel cold-deformed profile, joint work, deformation, cracking and structural strength.*