СТЕНОВЫЕ ПАНЕЛИ НА ОСНОВЕ КАССЕТНЫХ ПРОФИЛЕЙ. ЧАСТЬ 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

МАРТЫНОВ Ю.С., НАДОЛЬСКИЙ В.В., ВЕРЕВКА Ф.А.

Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь

Аннотация. На современном этапе развития ограждающих конструктивных систем широкое применение в качестве стенового ограждения получают конструктивные системы на основе тонкостенных оцинкованных профилей и эффективных утеплителей. Наибольшее распространение получило стеновое ограждение поэлементной сборки. Вместе с тем, появляются новые решения в виде панелей, компонуемых из элементов заводской готовности. Последние помимо технологических преимуществ по сравнению со стенами поэлементной сборки обладают повышенной несущей способностью и жесткостью. В настоящей статье представлено конструктивное решение стеновой самонесущей панели на основе кассетных профилей и профилированного настила, объединенных в единую пространственную конструктивную систему. Цель работы состояла в научном обосновании нового конструктивного решения панели на основе кассетных профилей и экспериментальном подтверждении её работоспособности. Объектом исследования является стеновое ограждение (панели) на основе указанных профилей. Методы исследования: численно – аналитические методы, экспериментальные исследования модели натурных размеров, графический анализ. Статья состоит из двух частей. Первая часть посвящена описанию, анализу и обоснованию конструкции стеновой панели, исследованию деформированного состояния кассетного профиля и оценке сопротивления и жесткости стеновой панели на основе расчетного метода. Во второй части отражены результаты экспериментальных исследований панели и ее компонентов, а также реализована процедура проектирования на основе испытаний.

Ключевые слова: тонкостенные профили, холодноформованные профили, характеристики эффективного сечения, закритическая работа пластин, потеря местной устойчивости, потеря устойчивости формы сечения.

WALL PANELS BASED ON CASSETTE PROFILES. PART 1. THEORETICAL RESEARCHES

MARTYNOV Y.S., NADOLSKI V.V., VIAROUKA F.A.

Belarusian National Technical University (BNTU), Minsk, Republic of Belarus

Abstract. Systems based on thin-walled galvanized profiles and effective heaters are widely used as wall fencing at present stage of development of enclosing structural systems. Wall fencing based on one-element assembly is most widespread. At the same time new solutions in the form of panels assembled from prefabricated elements are appeared. The latter in addition to technological advantages in comparison with the one-element assembly wall fencing have increased bearing capacity and rigidity. This article presents a constructive solution of a self-supporting wall panel based on cassette profiles and deck profiled sheets, combined into a single spatial structural system. The purpose of the work was to scientifically justify and experimentally confirm the operability of a new structural solution of the panel based on the cassette profile. The object of the study is a wall fence (panel) based on such profiles. Research methods: numerical and analytical methods, experimental studies of the full-scale model, graphical analysis. The article consists of two parts. The first part is devoted to the description, analysis and justification of the design of the wall panel and to the study of the deformed state of the cassette profile and the assessment of the resistance and stiffness of the wall panel based on the calculation method. The second part reflects the results of experimental studies of the panel and its components, and implements a design procedure based on tests.

Keywords: thin-walled profiles, cold-formed profiles, effective cross-sectional characteristics, supercritical plate operation, loss of local stability, loss of stability of the cross-section shape.

Введение

В настоящее время широкое распространение для стенового ограждения получили конструктивные системы на основе тонкостенных оцинкованных профилей и эффективных утеплителей [1-8]. Особое место занимают конструктивные решения фасадов на основе кассетного профиля, позволяющие достичь всесезонность монтажа и высокую скорость строительства, при этом данные фасады обладают архитектурной выразительностью благодаря возможности выбора практически любой облицовки. Масштабное возведение производственных и общественных зданий (гипермаркеты, логистические комплексы, складские помещения, офисные здания) значительно повлияло на расширение области применения кассетных профилей. Следует также отметить перспективную область применения данного конструктивного решения при реконструкции объектов промышленного назначения, в которых в качестве стенового ограждения использованы трехслойные керамзитобетонные панели. После 30-40 лет эксплуатации, особенно при эксплуатации в условиях негативного воздействия среды, состояние таких панелей не отвечает современным техническим требованиям безопасности, экономическим и эстетическим показателям. Таким образом, использование конструктивных решений для стеновых ограждений, в основе которых лежит применение тонкостенных кассетных профилей, имеет ряд значительных преимуществ: высокие эксплуатационные характеристики; возможность использования различных типов профилированных тонкостенных профилей, различных вариантов теплоизолирующих материалов; резкое снижение трудоёмкости монтажа особенно при реконструкции стенового ограждения зданий и сооружений; эстетическая привлекательность.

Наибольшее распространение получило стеновое ограждение поэлементной сборки, но и появляются новые решения в виде элементов заводской готовности (далее по тексту панелей). В настоящей работе представлено конструктивное решение стеновой самонесущей панели на основе кассетных профилей и профилированного настила [3], объединенных в единую пространственную конструктивную систему [9-11], которой присущи такие важные свойства, как перераспределение внутренних усилий между её компонентами, живучесть и надежность конструкции.

Авторами исследования был выполнен комплекс теоретических и экспериментальных работ. Разработана конструкция стеновой панели на основе кассетных профилей и профилированного настила из нержавеющей стали, исследовано деформированное состояние кассетного профиля и выполнена оценка сопротивления и жесткости стеновой панели с применением расчетного метода [1]. В данной части статьи представлены результаты теоретических исследований.

Вторая часть статьи посвящена экспериментальным исследованиям панели, реализации процедуры проектирования на основе испытаний.

1 Конструктивное решение стеновых панелей на основе кассетных профилей

Разработанное конструктивное решение самонесущих стеновых панелей состоит из кассетных профилей, соединённых между собой стенками и узкими полками; стального профилированного настила, прикрепленного перпендикулярно к узким полкам кассетного профиля и опорных элементов, расположенных по торцам панели. Совместная работа указанных компонентов панели обеспечивается постановкой при их сборке электрозаклепок или вытяжных заклепок «сталь-сталь» из нержавеющей стали.

Существенное влияние на выбор материала любой конструкции оказывает среда эксплуатации. Важнейшим условием обеспечения долговечности тонкостенного стенового ограждения является сведение к минимуму коррозионного воздействия. При эксплуатации в агрессивных средах целесообразно применение нержавеющей стали для всех компонентов стенового ограждения, включая крепежные элементы, а также необходимо исключение

непосредственного контакта указанных компонентов с поверхностью элементов несущего каркаса здания и фахверка, выполненных из углеродистых сталей. При выборе нержавеющей сталей следует руководствоваться таблицей А.1 ТКП EN 1993-1-4 [0]. В представленном исследовании кассетные профили и опорные элементы выполнены из нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т.

Рисунок 1 – Принципиальное решение стеновой панели: 1 – кассетный профиль; 2 – профилированный настил; 3 – опорный элемент; 4 – деталь крепления; Ш1 – соединение стенок кассетного профиля; Ш2 – соединение узких полок кассетного профиля; Ш3 – соединение крепежной детали с кассетным профилем; Ш4 – соединение опорного элемента с кассетным профилем и профнастилом

Кассетные профили представляют собой большие швеллерообразные профили с двумя узкими полками, двумя стенками и одной широкой полкой. Кассетные профили могут существенно отличаться по геометрии (форме и размерам) из-за разных технологических линий их производства. Для фасадной поверхности панели применен стеновой профилированный настил НС 35-1000-0.8 согласно ГОСТ 24045 [0]. Номинальный пролет настила 600 мм. Расчетная схема – техпролётная неразрезная балка. Опорные элементы установлены по торцам панели. Опорный элемент является одним из компонентов, обеспечивающих пространственную работу панели и надежность крепления панелей к стойкам фахверка. Сечение опорных элементов – неравнополочный гнутый швеллер.

Объединение компонентов в единую пространственную систему предлагается осуществлять электрозаклепками, выполненными контактной точечной сваркой сопротивлением, или вытяжными заклепками. Основной упор сделан на применение двухсторонней точечной сварки (клещами) в максимально возможном объеме. Разработан соответствующий порядок сборки панели, обеспечивающий доступ для выполнения двухсторонней сварки. Таким способом между собой соединяются кассетные профили, опорные элементы, вспомогательные крепежные детали. Для крепления стального профилированного листа к кассетным профилям применены вытяжные заклепки с сердечником и корпусом из нержавеющей стали.

2 Теоретические исследования деформированного состояния кассетного профиля при действии фронтальной нагрузки

Для анализа деформированного состояния кассетного профиля использован метод конечных полос $[0, 0]$, который позволяет оценить уровень критических сил потери устойчивости при соответствующей форме. Исходными данными для моделирования кассетного профиля являются характеристики стали, геометрия сечения, условия закрепления и раскрепления частей сечения, вид напряженного состояния профиля.

Критические силы и формы потери устойчивости кассетного профиля представлены при сжатии узких полок кассетного профиля (наиболее неблагоприятные напряженно-деформированные состояния панели). Эпюра напряжения в профиле принята в предположении действия изгибающего момента M_{Ed} , полученного из условия прочности полного сечения кассетного профиля в упругой стадии, т.е. $M_{Ed} = f_y \cdot W_{el}$.

Для анализа возможных форм потери устойчивости кассетного профиля рассмотрены следующие расчетные модели его работы под нагрузкой:

- отдельный (изолированный) профиль с закреплением только опорных сечений от смещения;
- отдельный (изолированный) профиль с учетом раскреплений верхних полок в горизонтальном направлении по длине профиля;
- профиль в составе стеновой панели.

Ниже приведены результаты для рассмотренных моделей. Для каждой модели получены зависимости коэффициента запаса (множитель, характеризующий уровень напряжений, при котором происходит потеря устойчивости по соответствующей форме) от длины волны потери устойчивости.

2.1 Устойчивость отдельного кассетного профиля

Из анализа зависимости коэффициента запаса от длины волны потери устойчивости (Рисунок 2) видно, что минимальные значения коэффициента запаса составляют 0.75 и 0.7 и соответствует длинам волны 0.2 м и 3.1 м. При длине волны 0.2 м сжатая полка профиля теряет местную устойчивость (рисунок 3а). При длине волны 3.1 м первая форма потери устойчивости отражает потерю общей устойчивости и потерю устойчивости формы сечения (рисунок 3б).

Рисунок 2 – Зависимость коэффициента запаса k от длины волны l при потере устойчивости

Рисунок 3 – Первая форма потери устойчивости отдельного (изолированного) кассетного профиля:
а) – при длине волны 0.2 м; б) – при длине волны 3.1 м

2.2 Устойчивость отдельного кассетного профиля при раскреплении сжатых узких полок из плоскости

Из анализа зависимости коэффициента запаса по устойчивости от длины волны (рисунок 4) видно, что минимальное значение коэффициента запаса 0.75 соответствует длине волны 0.2 м, т.е. раскрепление сжатых полок из плоскости не повлияло на значение коэффициента запаса по местной устойчивости (сжатой узкой полки кассетного профиля). При этом значительно повысился коэффициент запаса по общей устойчивости и устойчивости формы сечения. Общий характер форм потери устойчивости аналогичен приведенным на рисунках 3а, 3б.

Рисунок 4 – Зависимость коэффициента запаса k от длины волны l при потере устойчивости при раскреплении сжатых полок из плоскости

2.3 Устойчивость кассетного профиля в составе стеновой панели

Анализ зависимости коэффициента запаса от длины волны потери устойчивости соединённых профилей (в составе панели) увеличились по сравнению с их значениями, полученными для одиночного профиля. Минимальные значения коэффициента запаса 1.18 и 1.17 соответственно для длин волн 0.2 м и 2.3 м. При длине волны 0.2 м профиль теряет местную устойчивость (рисунок 6). При длине волны 2.3 м проявляется потеря устойчивости формы сечения (рисунок 7).

Рисунок 5 – Зависимость коэффициента запаса k от длины волны l потери устойчивости для кассетного профиля в составе панели

Рисунок 6 – Первая форма потери устойчивости кассетного профиля в составе панели при длине волны 0.2 м

Рисунок 7 – Первая форма потери устойчивости кассетного профиля в составе панели при длине волны 2.3 м

Из анализа напряженно-деформированного состояния видно, что наиболее вероятная форма отказа стеновой панели будет сопровождаться потерей местной устойчивости сжатой полки кассетного профиля.

3. Оценка несущей способности компонентов стеновой панели

Для оценки несущей способности панелей принята расчетная методика, изложенная в ТКП EN 1993-1-3 [0], в котором определены все требования к проектированию профилированных листов и холодноформованных элементов, а также холодноформованных стальных изделий, изготовленных путем холодного формования или прессования из холодно- или го-

рячекатаных полос или листов, как с покрытием, так и без него. В данном техническом кодексе приводятся как расчетные методы проектирования, так и методы использующие результаты испытаний для кассетных профилей, однако следует отметить, что данная методика не в полной мере отражает поведение кассетного профиля в составе панели. Далее представлены результаты оценки несущей способности компонентов панели.

При определении расчетных характеристик профиля учитывалось возможное снижение площади сечения, момента инерции, моментов сопротивления вследствие потери местной устойчивости сжатых частей сечения. В этом случае в качестве расчетного принимается эффективное (редуцированное) сечение, из состава которого исключаются неустойчивые части сечения.

3.1 Сопротивление изгибу кассетного профиля при растяжении широкой полки

Сопротивления изгибу $M_{b,Rd}$ кассетного профиля определяется по следующему выражению (формула 10.21 [0]):

$$M_{b,Rd} = 0,8 \cdot \beta_b \cdot W_{eff,com} \cdot f_{yb} / \gamma_{M0}, \text{ но } M_{b,Rd} \leq 0,8 \cdot W_{eff,t} \cdot f_{yb} / \gamma_{M0},$$

где $W_{eff,com} = I_{y,eff} / z_c$ — момент сопротивления эффективного сечения для сжатого волокна;

$W_{eff,t} = I_{y,eff} / z_t$ — момент сопротивления эффективного сечения для растянутого волокна;

β_b — поправочный коэффициент, учитывающий раскрепление узких полок из плоскости;
 f_{yb} — основной предел текучести.

При этом эффективное сечение кассетного профиля при растяжении широкой полкой рассчитано с использованием поэтапной процедуры (Рисунок 8) ТКП EN 1993-1-3 [0] в следующей последовательности:

- Определение характеристик полного поперечного сечения;
- Определение эффективной ширины широкой (растянутой) полки $b_{u,eff}$, с учетом ее возможного искривления(коробления), по формуле:

$$b_{u,eff} = \frac{53,3 \cdot 10^{10} e_o^2 \cdot t^3 \cdot t_{eq}}{h \cdot L \cdot b_u^3},$$

где b_u — полная ширина широкой полки;

e_o — расстояние от центральной оси полного поперечного сечения до центральной оси узких полок;

h — общая высота кассетного профиля;

L — пролет кассетного профиля;

t_{eq} — эквивалентная толщина широкой полки, $t_{eq} = (12 I_a / b_u)^{1/3}$;

I_a — собственный момент инерции сечения широкой полки;

Для рассматриваемого профиля:

$$e_o = 113 \text{ мм}; t_{eq} = (12 I_a / b_u)^{1/3} = (12 \cdot 0,24 \text{ см}^4 / 59,5 \text{ см})^{1/3} = 0,36 \text{ см} = 3,6 \text{ мм};$$

$$b_{u,eff} = 53,3 \cdot 10^{10} \cdot e_o^2 \cdot t^3 \cdot t_{eq} / (h \cdot L \cdot b_u^3) = 53,3 \cdot 10^{10} \cdot 113^2 \cdot 1,2^3 \cdot 3,6 / (150 \cdot 6000 \cdot 59,5^3) = 223 \text{ мм};$$

- Определение эффективной ширины сжатых полок и элементов жесткости, но при полной площади стенок;
- Определение эффективной площади сжатых стенок, основываясь на отношении напряжений $\psi = \sigma_2 / \sigma_1$, полученных с использованием эффективной ширины полок, но при полной площади стенок;
- Определение характеристик эффективного (редуцированного) поперечного сечения.

Рисунок 8 – Определение эффективного сечения кассетного профиля при растяжении широкой полки

Графическое изображение эффективного поперечного сечения кассетного профиля для определения предельного момента при растяжении широкой полки представлено на рисунке 9. Основные геометрические характеристики эффективного поперечного сечения кассетного профиля приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристики эффективного сечения

Характеристика	Обозначение	Численное значение	Ед. измер.
Площадь	A	6.64	см ²
Моменты инерции	I _y	189.22	см ⁴
Моменты сопротивления	W _{y,max}	40.25	см ³
	W _{y,min}	-17.8	см ³

Рисунок 9 – Эффективное поперечное сечение кассетного профиля для определения предельного момента при растяжении широкой полки

Подставив значения всех величин, получим расчетное сопротивление изгибу одного кассетного профиля:

$$M_{b,Rd} = 0.8 \cdot \beta_b \cdot W_{eff,com} \cdot f_{yb} / \gamma_{M0} = 0.8 \cdot 1 \cdot 17.8 \text{ см}^3 \cdot 220 \text{ МПа} / 1.0 = 3.13 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

3.2 Сопротивление изгибу стеновой панели при сжатии широкой полки

Расчетное сопротивление изгибу одного кассетного профиля $M_{b,Rd}$ из условия потери устойчивости определено по следующему выражению:

$$M_{b,Rd} = 0.8 \cdot W_{eff,min} \cdot f_{yb} / \gamma_{M0} = 0.8 \cdot 1 \cdot 22.35 \text{ см}^3 \cdot 220 \text{ МПа} / 1.0 = 3.93 \text{ кН} \cdot \text{м},$$

где $W_{eff,min}$ – минимальный момент сопротивления эффективного сечения;

β_b – поправочный коэффициент, учитывающий раскрепление узких полок из плоскости;
 f_{yb} – основной предел текучести.

Эффективное сечение кассетного профиля при сжатии широкой полкой рассчитано с использованием поэтапной процедуры (Рисунок 10) ТКП EN 1993-1-3 [0] в следующей последовательности:

- Определение эффективной ширины сжатой полки и элементов жесткости, но при полной площади стенок;
- Определение эффективной площади стенки сечения, основываясь на отношении напряжений $\psi = \sigma_2 / \sigma_1$, полученных с использованием эффективной ширины сжатых полок, но при полной площади стенок;
- Определение характеристик эффективного (редуцированного) поперечного сечения.

Рисунок 10 – Определение эффективного сечения кассетного профиля при сжатии широкой полки

Графическое изображение эффективного поперечного сечения кассетного профиля для определения предельного момента при сжатии широкой полки представлено на рисунке 11. Основные геометрические характеристики эффективного поперечного сечения кассетного профиля приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Характеристики эффективного сечения

Характеристика	Обозначение	Численное значение	Ед. измер.
Площадь	A	5.6	см ²
Моменты инерции	I _y	175.5	см ⁴
	I _z	4872.2	см ⁴
Моменты сопротивления	W _{y,max}	22.35	см ³
	W _{y,min}	-24.16	см ³

Рисунок 11 – Эффективное поперечное сечение кассетного профиля для определения предельного момента при сжатии широкой полки

3.3 Несущая способность электрозаклепок, формируемых точечной сваркой сопротивлением

Согласно 8.4(1)Р ТКП EN 1993-1-3 [0] допускается применять электрозаклепки, полученные точечной сваркой, в соединениях с основным материалом из прокатного или оцинкованного металла толщиной менее 4,0 мм, при этом наиболее тонкий из соединяемых элементов должен иметь толщину не более 3,0 мм.

В соединениях, работающих на сдвиг сопротивление срезу:

$$F_{v,Rd} = \frac{\pi}{4} \cdot d_s^2 f_u / \gamma_{M2} = \frac{3,14}{4} \cdot 4,5^2 \cdot 510 / 1,25 = 6485 H.$$

Сопротивление смятию и разрыву:

$$F_{tb,Rd} = 2,7 \sqrt{t} d_s f_u / \gamma_{M2} = 2,7 \sqrt{0,8} \cdot 4,5 \cdot 510 / 1,25 = 4434 H,$$

где d_s – внутренний диаметр электрозаклепки, при сварке сопротивлением:

$$d_s = 5 \cdot \sqrt{t} = 5 \cdot \sqrt{0,8} = 4,5 \text{ мм.}$$

t – толщина наиболее тонкого присоединенного листа, мм;

f_u – временное сопротивление соединяемых листов;

$\gamma_{M2} = 1,25$ – частный коэффициент.

Согласно 8.4(7)Р ТКП EN 1993-1-3 [0] значение d_s должно быть проверено в реальных условиях посредством испытаний на сдвиг с использованием образцов с одиночным нахлестом в соответствии с положениями раздела 9 ТКП EN 1993-1-3 [0], а также толщина образца t должна быть равной реализованной в конкретном случае.

За расчетную несущую способность принимается меньшее из приведенных значений. При этом должно выполняться условие: $F_{v,Rd}$ не более $1,25 F_{tb,Rd}$ и не более значения, полученного на основании результатов испытаний согласно А.6 ТКП EN 1993-1-3 [0].

В соединениях, работающих на растяжение сопротивление разрыву рекомендуется определять посредством испытания образцов соединений на растяжение согласно ГОСТ 6996-66 [9], т.к. в ТКП EN 1993-1-3 [0] такие испытания не предусмотрены.

3.4 Несущая способность вытяжных заклепок из нержавеющей стали в соединениях

Сопротивление смятию определено согласно выражению:

$$F_{v,Rd} = \alpha \cdot f_u \cdot d \cdot t / \gamma_{M2} = 1,6 \cdot 510 \cdot 4 \cdot 0,8 = 2611 H,$$

где $\alpha = 3,6 \sqrt{t/d} = 1,6$.

Сопротивление срезу необходимо определять посредством испытания образцов соединений по ISO 14589:2000 «Заклепки глухие. Механические испытания» [10].

Заключение

В целом стеновую панель с применением кассетных профилей можно охарактеризовать как многокомпонентную пространственную конструкцию, для которой в качестве наиболее вероятной причины отказа можно назвать потерю местной устойчивости *сжатой полки* кассетного профиля. Также возможно коробление (выгиб) растянутых широких полок кассетного профиля, что в целом, вероятно, не станет причиной потери несущей способности панели, но может повлиять на выдергивание вытяжных заклепок из кассетного профиля. Также теоретически возможен срез или разрыв электрозаклепок, полученных точечной сваркой, однако уточнение фактической работы данных компонентов панели под расчетной

нагрузкой и их влиянии на несущую способность всей панели возможно лишь на основании проведения испытаний.

Стоит отметить, что методы проектирования на основе расчета применимы *только* для конструкций, свойства материалов и геометрические параметры которых находятся в области, для которой накоплен достаточный опыт и доступны экспериментальные данные. Ввиду сложной формы сечения исследуемой панели теоретически сложно и трудоемко установить количественные критерии для редуцирования сечения. Это обусловлено тем, что все расчеты базируются на вычислении критических напряжений, соответствующих потере местной устойчивости элементов сечения, формы сечения и общей устойчивости конструкции в целом. Поэтому для практических расчетов нормами ТКП EN 1993-1-3[0] предусмотрены приближенные процедуры редуцирования сечения и порядок определения сопротивления изгибу для отдельного кассетного профиля, а не панели. Как отмечено, работа изолированного профиля не идентична работе в составе панели. При этом несущая способность кассетного профиля (основного компонента панели) занижена, в результате чего сопротивление панели существенно отличается от фактического.

Учитывая вышеизложенное основным наиболее объективным и экономичным методом проектирования панелей следует считать метод, основанный на результатах испытаний. Испытания необходимы при отсутствии адекватных расчетных моделей; при использовании большого количества однотипных элементов конструкций; для подтверждения допущений, принятых в расчетах (п.5.2. ТКП EN 1990[11]). Испытания могут быть использованы для определения предельного изгибающего момента и эффективной изгибной жесткости панели по графику зависимости прогиба от нагрузки (А.2.2 ТКП EN 1993-1-3[0]) и на основании этих данных становится возможным объективное определение расчетной несущей способности конструкции или её части (А.4.2 ТКП EN 1993-1-3[0]). Результаты экспериментальных исследований представлены во второй части статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Еврокод 3. Проектирование стальных конструкций. Часть 1-3. Общие правила. Дополнительные правила для холодноформованных элементов и профилированных листов: ТКП EN 1993-1-3-2009. Минск : МАиС, 2014.
2. Еврокод 3. Проектирование стальных конструкций. Часть 1-4. Общие правила. Дополнительные правила для нержавеющей стали: ТКП EN 1993-1-4-2009. Минск : МАиС, 2010.
3. ГОСТ 24045 -2016. Профили стальные листовые гнутые с трапециевидными гофрами для строительства. Технические условия.
4. Schafer B. W., Ádány S. Buckling analysis of cold-formed steel members using CUFSM: conventional and constrained finite strip methods // Proceedings of 18th International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures, October 26-27, 2006. Orlando, Florida. 2006. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org> (Available on 15.05.2019).
5. Cheung Y.K., Tham L.G. The Finite Strip Method // CRC Press. 1998. Pp. 7–28.
6. Papangelis J.P., Hancock G.J. Computer analysis of thin-walled structural members // Computers & Structures, Pergamon. 1995. 56(1). Pp. 157-176.
7. Rhodes J. Post-buckling analysis of light gauge members using finite strips // Sixteenth International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures. Orlando, FL USA, October 7-18, 2002.
8. Silvestre N., Camotim D. First-order generalised beam theory for arbitrary orthotropic materials // Thin-Walled Structures. 2002. 40 (9). Pp. 755-789.
9. ГОСТ 6996-66. Сварные соединения. Методы определения механических свойств.
10. ISO 14589:2000. Закlepки глухие. Механические испытания
11. Еврокод. Основы проектирования строительных конструкций: ТКП EN 1990-2011. Введ. 01.07.12. Минск: Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2012. 70 с.

REFERENCES

1. Eurocode 3. Design of steel structures. Part 1-3. General rules. Additional rules for cold formed elements and profiled sheets: TKP EN 1993-1-3-2009. Minsk: MAiS, 2014.
2. Eurocode 3. Design of steel structures. Part 1-4. General rules. Additional rules for stainless steel: TKP EN 1993-1-4-2009. Minsk: MAiS, 2010.

3. Standard of Russian Federation GOST 24045 -2016. Profili stal'nyye listovyye gnutyye s trapetsiyevidnymi goframi dlya stroitel'stva. Tekhnicheskiye usloviya [Bent steel sheet profiles with trapezoidal corrugations for construction. Technical conditions].
4. Schafer BW, Ádány S. Buckling analysis of cold-formed steel members using CUFSM: conventional and constrained finite strip methods. Proceedings of the 18th International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures, October 26-27, 2006. Orlando, Florida. 2006. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org> (Available on 05/15/2019).
5. Cheung Y.K., Tham L.G. The Finite Strip Method // CRC Press. 1998. Pp. 7–28.
6. Papangelis J.P., Hancock G.J. Computer analysis of thin-walled structural members. *Computers & Structures*. 1995. 56 (1). Pp. 157-176.
7. Rhodes J. Post-buckling analysis of light gauge members using finite strips. Sixteenth International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures. Orlando, FL USA, October 7-18, 2002.
8. Silvestre N., Camotim D. First-order generalized beam theory for arbitrary orthotropic materials. *Thin-Walled Structures*. 2002. 40 (9). Pp. 755-789.
9. Standard of Russian Federation GOST 6996-66. Svarnyye soyedineniya. Metody opredeleniya mekhanicheskikh svoystv [Welded joints. Methods for determining mechanical properties].
10. ISO 14589: 2000. Rivets are deaf. Mechanical tests
11. Eurocode. Fundamentals of the design of building structures: ТКР EN 1990-2011. Entered 07/01/12. Minsk: Ministry of Architecture and Construction of the Republic of Belarus, 2012. 70 p.

Информация об авторах:

Мартынов Юрий Семенович

Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь,
Кандидат технических наук, профессор, профессор кафедры «Строительные конструкции»,
E-mail: jusmar@mail.ru.

Надольский Виталий Валерьевич

Кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Строительные конструкции»,
E-mail: Nadolskivv@mail.ru

Верёвка Фёдор Александрович

Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь,
аспирант, ассистент кафедры «Строительные конструкции»,
E-mail: verevka.fedor@mail.ru

Information about authors:

Martynov Yuriy S.

Belarusian National Technical University (BNTU), Minsk, Republic of Belarus,
PhD, professor, professor of Department of “Building constructions”,
E-mail: jusmar@mail.ru.

Nadolski Vitaly V.

Belarusian National Technical University (BNTU), Minsk, Republic of Belarus,
PhD, an assistant professor, an assistant professor Department of “Building constructions”,
E-mail: Nadolskivv@mail.ru

Viarouka Fiodar A.

Belarusian National Technical University (BNTU), Minsk, Republic of Belarus,
Postgraduate, assistant of Department of “Building constructions”,
E-mail: verevka.fedor@mail.ru