

УДК 624.21.014.2

Методическое обоснование расчета холодногну­тых стальных тонкостенных профилей в мостовых конструкциях на этапе проекта

Н. А. Соловьев, С. В. Чижов, Ю. В. Авдей

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Соловьев Н. А., Чижов С. В., Авдей Ю. В. Методическое обоснование расчета холодногну­тых стальных тонкостенных профилей в мостовых конструкциях на этапе проекта // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 3. С. 622–637. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-03-622-637

Аннотация

Цель: выполнить сравнительный анализ особенностей существующих теорий расчета холодногну­тых стальных тонкостенных профилей, рассмотреть вопрос о необходимости разработки методики расчета и обоснование критериев применимости холодногну­тых стальных тонкостенных профилей в основных конструкциях мостовых сооружений, обосновать целесообразность применения конструкций из тонкостенных холодногну­тых профилей применительно к мостостроению с целью снижения металлоемкости и повышения экономической эффективности. **Методы:** сравнение существующих теорий расчета холодногну­тых стальных тонкостенных профилей на данный момент, обзор существующей практики применения и технико-экономических показателей тонкостенных профилей в области промышленного и гражданского строительства. **Результаты:** выполнен сравнительный анализ особенностей, достоинств и недостатков отдельных теорий расчета холодногну­тых стальных тонкостенных профилей, установлены критерии выбора теории расчета в зависимости от характера их работы. Приведены некоторые технико-экономические показатели сходных конструкций из холодногну­тых стальных тонкостенных профилей в конструкциях зданий промышленного, гражданского, сельскохозяйственного и иного назначения. Анализ показал, что данные конструкции имеют меньшую металлоемкость по сравнению с обычными стальными конструкциями. **Практическая значимость:** обозначена необходимость в разработке методики расчета конструкций из холодногну­тых стальных тонкостенных профилей применительно к мостостроению. Данная методика имеет практическую значимость для внедрения тонкостенных профилей в основных конструкциях мостов. Приведен ряд факторов, которые могут оказаться решающими в пользу выбора холодногну­тых стальных тонкостенных профилей в составе несущих конструкций главных балок мостов при соответствующем технико-экономическом обосновании в определенных условиях с учетом их особенностей, достоинств и недостатков.

Ключевые слова: холодногну­тый стальной тонкостенный профиль, ЛСТК, теория Власова, теория критической несущей способности, коробление, бимомент, местная устойчивость, пешеходный мост

Введение

Постоянно возрастающая потребность в строительстве мостовых сооружений на территории нашей страны для пересечения различных преград, а также непрерывное увеличение стоимости строительных материалов требуют находить новые, более экономичные решения конструкций пролетных строений, надежно выполняющих

свои эксплуатационные показатели в течение полного срока службы.

Одним из решений данной задачи может послужить использование холодногнутой стальных тонкостенных профилей в несущих конструкциях мостовых сооружений. Различные преимущества холоднодеформированной стали вызывают растущий интерес в исследовательской сфере, особенно в промышленно развитых странах.

Технология строительства из тонкостенных профилей появилась в Канаде и нашла массовое применение для строительства жилых зданий в 50-х годах прошлого столетия на территории Северной Америки, а затем и в Европе. Использование этих профилей в несущих конструкциях зданий сельскохозяйственного, промышленного, гражданского и других назначений на сегодняшний день является ключевым направлением в эффективном строительстве и получило широкое распространение в России и других странах [1]. Стропильные фермы из тонкостенных профилей уже успешно применяют в зданиях с пролетами до 100 м [2].

Тонкостенный профиль является наиболее современным и оптимальным типом конструкционных материалов, которые позволяют достичь наименьшего веса при максимальной жесткости [3].

Тонкостенные стальные холодногнутые профили изготавливают путем холодного пластического формообразования из стальных штрипсов (в большинстве случаев с цинковым покрытием), скрученных в бухты длиной до 900 м, методом холодной прокатки на прокатных многовалковых станах или методом штамповки на гибочных прессах. Метод холодной прокатки отличается более высокой производительностью, что важно при производстве профилей в большом объеме. Метод

штамповки на гибочных прессах оправдан при небольших партиях или при работе с более толстым металлом. Метод штамповки также позволяет получать гибы меньшего радиуса, что положительно сказывается на прочностных качествах получаемого профиля, однако существует ограничение по длине, обусловленное длиной рабочей части станков. Толщина тонкостенных профилей не превышает 4 мм [4].

К известным типам соединений в конструкциях из стальных тонкостенных холодногнутой профилей можно отнести механические, сварные и клеевые. Наиболее часто используемые механические соединения выполняются при помощи болтов с гайками размерами М5–М16, самосверлящих винтов и вытяжных заклепок. Сварные соединения выполняют такими методами сварки, как дуговая в защитных газах, ручная дуговая, неплавящимся электродом и плазменная. После выполнения сварных соединений необходимо восстановление защитного покрытия скрепляемых профилей. С этой точки зрения применение сварных соединений для профилей, имеющих защитное покрытие, часто оказывается неоправданным. Клеевые составы (эпоксидные или акриловые) обычно используют совместно с механическими соединениями для повышения их прочности. Применение клея также позволяет более равномерно распределять нагрузку, приходящуюся на соединение.

В стропильных фермах в диапазоне пролетов от 6 до 15 м использование холодногнутой тонкостенных профилей позволяет получить наименьший расход стали. Снижение металлоемкости по сравнению с конструкциями со сплошной стенкой и решетчатыми конструкциями из горячекатаных профилей достигает 60 % и 40 % соответственно.

Однако проведенные в СССР исследования технико-экономических показателей стропильных ферм из тонкостенных профилей при пролетах 18–30 м выявили их экономическую эффективность до пролетов величиной 24 м [4].

Помимо более низкого расхода металла, при выполнении расчетов технико-экономических показателей необходимо учитывать повышенную стоимость тонкостенных стальных профилей по отношению к прокатным профилям в перерасчете на 1 т стали.

Конструкции из холодногнутого тонкостенного профиля являются конструкциями высокой степени заводской готовности, способствующей росту производительности труда. Они могут доставляться на объект в виде готового для сборки комплекта из нарезанных на нужную длину элементов с необходимыми отверстиями для соединений. Элементы изготавливаются на поточных линиях, что существенно ускоряет темп производства работ и облегчает сборку. Малая металлоемкость выгодна не только с точки зрения экономии металла, но и с точки зрения уменьшения собственного веса самих конструкций, что позволит снизить стоимость транспортировки и отказаться от кранов и другого тяжелого подъемного оборудования, что особенно важно в труднодоступных местах, где нет возможности подъезда для крупногабаритной строительной техники. Меньшая постоянная нагрузка от конструкций также выгодна с точки зрения работы фундаментов, так как позволяет применять более экономичные и простые решения. Все работы по монтажу возможно вести при помощи самого распространенного строительного оборудования, имеющегося на балансе практически в каждой подрядной организации. Вместе

с этим необходимо осторожное обращение с данными конструкциями при погрузке, разгрузке и монтаже ввиду их тонкостенности. Полученные в ходе неаккуратного обращения деформации могут существенно сказаться на несущей способности.

Использование штрипсов с цинковым покрытием при производстве профилей позволяет сократить затраты на окраску и текущее содержание конструкций, что в итоге скажется на снижении полной стоимости жизненного цикла конструкции. Цинковое покрытие выполняет как барьерную функцию по защите стали от возникновения очагов коррозии, так и электрохимическую, образуя катодно-анодную пару с защищаемой сталью. Цинк, являясь более активным металлом, при повреждении покрытия первым вступает в реакцию коррозии, оставляя защищаемую сталь практически без повреждений. Однако большая чувствительность тонких стенок рассматриваемых профилей к коррозии с точки зрения прочностных качеств обуславливает их рациональное применение без опасений только в неагрессивных и слабоагрессивных средах по отношению к стали. Потеря цинка в зависимости от времени носит линейный характер, что позволяет с достаточной точностью назначать величину защитного покрытия в зависимости от степени агрессивности среды и требуемого срока службы конструкции.

Несмотря на такие преимущества, как сниженные расходы на производство, транспортировку, рабочую силу и более высокое соотношение прочности к весу, холодногнутые стальные тонкостенные профили характеризуются сложным поведением под внешней нагрузкой и сложными проблемами, связанными с устойчивостью. Для изучения этих свойств и поиска соответствующих

изменений в расчетных моделях и нормативных документах было проведено множество исследований.

Отсутствие технико-конструктивных решений по применению холодногнутого стальных тонкостенных профилей в мостовых конструкциях на территории Российской Федерации объясняется пробелами в методической и нормативной базах по их расчету для объектов транспортного строительства, а не недостаточной несущей способностью самих профилей или их нерешаемыми недостатками. Они успешно зарекомендовали себя в других областях строительства при решении оптимизационной задачи по снижению металлоемкости. Для внедрения холодногнутого стальных тонкостенных профилей в несущих конструкциях в области мостостроения необходимо преодолеть разрыв между существующими нормативными документами по расчету тонкостенных конструкций и нормативными документами в области транспортного строительства в отношении расчета и проектирования мостовых конструкций с учетом их особенностей и предъявляемых требований.

Отличительные особенности работы холодногнутого стальных тонкостенных профилей

Прочностные качества стали зависят от ее химического состава и способа производства. К характерным особенностям профилей, связанным со спецификой их изготовления, которые оказывают влияние на напряженно-деформируемое состояние, относят: существенное увеличение предела текучести и временного сопротивления стали в местахгиба при их производстве; остаточные деформации и геометрические несовершенства формы. Деформационное упрочнение явля-

ется одним из видов упрочнения стали за счет перестройки кристаллической решетки в результате пластической деформации. Также существенные отличия в работе рассматриваемых профилей в сравнении со стержнями сплошного сечения обусловлены наличием тонких стенок. При расчетах необходимо учитывать проблемы устойчивости, часто не имеющие приемлемых аналитических решений. Для этих целей выводились полуэмпирические формулы, основанные на масштабных экспериментальных испытаниях [4].

Для холодногнутого профилей характерны следующие формы потери устойчивости:

- местная, или локальная;
- общая (изгибная, крутильная, изгибно-крутильная);
- потеря формы сечения (искажение) [5].

Применение методов из инженерной теории пластичности при анализе работы тонкостенных профилей может привести к грубой ошибке, так как в большинстве случаев изменение формы профиля или потеря местной устойчивости ограничивает возникновение пластических шарниров [4].

При расчетах конструкций из холодногнутого стальных тонкостенных профилей с защитным покрытием необходимо учитывать его величину. Толщину профилей указывают с учетом толщины покрытия, выраженной в массе покрытия с двух сторон листа на квадратный метр. Для определения толщины стального ядра, способного воспринимать внешнюю нагрузку, необходимо знать плотность защитного покрытия.

Конструкции из холодногнутого стальных тонкостенных профилей целесообразно применять при постоянных нагрузках и переменных нагрузках статического характера. Применение холодногнутого профилей в элементах конструкций, воспринимающих

удары или местное давление, нежелательно из-за опасности местных деформаций, способных вызвать потерю местной устойчивости [4].

Методы расчета холодногнутого стальных тонкостенных профилей

В рамках данной статьи будут рассмотрены основные аналитические и полуаналитические методы расчета холодногнутого стальных тонкостенных профилей и их главные положения. Численные (метод конечных элементов) и эмпирические (испытания образцов) методы не будут затронуты.

Для расчета холодногнутого тонкостенных профилей, за исключением случая работы профиля на осевое растяжение, существуют две фундаментальные теории, основанные на абсолютно разных принципах: теория тонкостенного стержня В. З. Власова и теория закрытой несущей способности. Каждая из этих двух теорий расчета дополняется частными решениями отдельных проблем (несущая способность стенки от влияния внешних сосредоточенных нагрузок, изменение кривизны профиля и т. д.), способных оказать при расчете тонкостенных профилей существенное влияние на несущую способность и обычно не рассматриваемых в классических стальных конструкциях [4]. Только в частном случае, при работе холодногнутого профиля на осевое растяжение, будет справедливо применять теорию призматического стержня сплошного сечения.

По теории тонкостенного стержня В. З. Власова, к тонкостенным стержням относятся тонкостенные пространственные системы типа оболочки, для которых длина, ширина и толщина определены величинами разных порядков. Этим условиям отвечают все холодногнутые профили открытого профиля [4, 3].

Особенностью работы тонкостенного стержня, по теории В. З. Власова, является искривление плоского поперечного сечения вдоль стержня, вызванное продольным перемещением точек сечения из его плоскости во время кручения. Данное нарушение плоскостности называют депланацией, или короблением. Нормальные напряжения, возникающие пропорционально этой деформации по закону Гука, имеют значительную величину и долго уменьшаются вдоль стержня по мере удаления от места приложения нагрузки [4]. Эта особенность в поведении тонкостенных стержней под нагрузкой, вызывающей кручение, не позволяет использовать принцип Сен-Венана к их расчету [3, 6]. Гипотеза плоских сечений справедлива только в частном случае приложения внешней поперечной нагрузки через так называемый центр изгиба [7].

В основе теории В. З. Власова лежат две геометрические гипотезы:

- а) недеформируемый контур в плоскости поперечного сечения;
- б) отсутствие деформации сдвига срединной поверхности [3].

При расчете по теории В. З. Власова тонкостенный стержень открытого профиля представляют в виде стержневого элемента с дополнительной степенью свободы, разрешающей возникновение депланации, с соответствующим силовым фактором под названием бимомент [7].

Вследствие депланации (коробления) поперечного сечения стержня возникают дополнительные секториальные нормальные напряжения σ_{ω} :

$$\sigma_{\omega} = \frac{B_{\omega}}{W_{\omega}}. \quad (1)$$

Секториальные нормальные напряжения σ_{ω} образуют систему внутренних усилий,

статический эквивалент которых равен нулю, и распределяются по сечению по закону секториальной координаты ω (рис. 1):

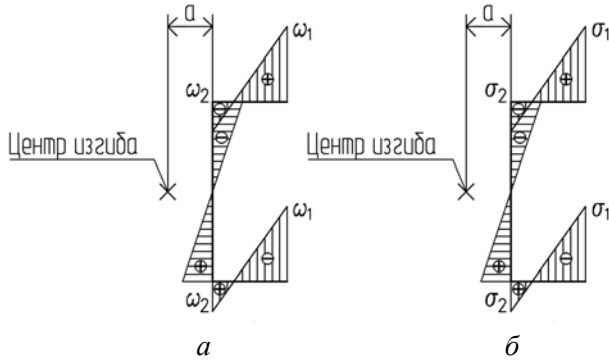


Рис. 1. Эпюры: *a* — эпюра секториальных координат в с-образном профиле; *б* — эпюра распределения секториальных нормальных напряжений в с-образном профиле

В отличие от формулы «классической» строительной механики при расчете нормальных напряжений в случае сложного сопротивления добавляется компонент дополнительных секториальных напряжений от бимоента B_ω / W_ω , вызванного короблением поперечного сечения [7].

$$\sigma = \frac{N}{A} + \frac{M_x}{W_x} + \frac{M_y}{W_y} + \frac{B_\omega}{W_\omega}, \quad (2)$$

- где N — продольная сила;
- A — площадь сечения;
- M_x, M_y — изгибающие моменты относительно осей $x-x$ и $y-y$ соответственно;
- W_x, W_y — моменты сопротивления сечения относительно осей $x-x$ и $y-y$ соответственно;
- B_ω — бимомент;
- W_ω — секториальный момент сопротивления.

Данная формула в преобразованном виде предлагается для проверки прочности элементов, достигающих предельного состояния

в упругопластической стадии в своде правил СП 16.13330.2017 «Стальные конструкции» [8] (неравенство 3), являющихся актуализированной редакцией старых норм СНИП П-23–81* «Стальные конструкции» [9], в которых учет бимоента не предполагался (неравенство 4). Как видно из неравенств, при совершенствовании норм по расчету и проектированию стальных конструкций потребовалось введение дополнительных секториальных напряжений, возникающих в результате деформации поперечного сечения и способных оказать существенный вклад при оценке несущей способности. Однако стоит отметить, что вышеуказанный свод правил не распространяет свое действие на проектирование стальных конструкций мостов. В своде правил СП 35.13330.2011 «Мосты и трубы» до сих пор нет никаких рекомендаций по расчету на прочность с учетом деформации (неравенство 5).

$$\left(\frac{N}{A_n R_y \gamma_c} \right)^n + \frac{M_x}{c_x W_{xn, min} R_y \gamma_c} + \frac{M_y}{c_y W_{yn, min} R_y \gamma_c} + \frac{B}{W_{\omega n, min} R_y \gamma_c} \leq 1, \quad (3)$$

$$\left(\frac{N}{A_n R_y \gamma_c} \right)^n + \frac{M_x}{c_x W_{xn, min} R_y \gamma_c} + \frac{M_y}{c_y W_{yn, min} R_y \gamma_c} \leq 1, \quad (4)$$

$$\frac{N}{A_n} \pm \frac{M_x}{\chi_x I_{xn}} y \pm \frac{M_y}{\chi_y I_{yn}} x \leq R_y m. \quad (5)$$

Теорию В. З. Власова развивали и дополняли такие исследователи, как В. Г. Александров, А. П. Анучкин, Е. А. Бейлин, Г. И. Белый, Д. В. Бычков, Б. Н. Горбунов, Г. Ю. Джанелидзе, Н. А. Кузьмин, П. А. Лукаш, И. Е. Милейковский, А. К. Мроцинский, Я. Г. Пановко, С. Н. Пичугин, В. А. Постнов,

П. А. Пяткин, Н. Н. Родиков, С. Н. Сергеев, Н. Г. Сотников, А. И. Стрельбицкая, А. А. Уманский, И. Я. Хархурим и др. Изучению вопросов устойчивости пластин посвятили себя такие ученые, как Б. М. Броуде, Е. В. Борисов, Ф. Блейх, Я. Брудка, А. С. Вольмир, И. Б. Ефимов, Э. Стоуэл и др. [7].

Наилучшее соответствие теории В. З. Владова практике было получено при исследовании общей устойчивости тонкостенных стержней в случае обеспечения устойчивости формы контура, то есть при соблюдении гипотезы жесткого контура, лежащей в основе данной теории. При расчетах необходима дополнительная проверка на местную устойчивость. Потеря местной устойчивости при тонких стенках может оказывать влияние на несущую способность даже больше, чем напряжения, возникающие вследствие деформации сечения [4].

Теория заkritической несущей способности опирается на диаметрально противоположное: на ранних этапах нагружения, после превышения критического напряжения и потери местной устойчивости в средней части, стенка способна к дальнейшему восприятию нарастающей внешней нагрузки, если соблюдается условие прямолинейности одной или нескольких граней профиля, что объясняется возможностью работы тонких пластин в заkritической стадии. Прогиб части стенки обычно выше ее толщины, устойчивость новой формы обеспечивается за счет возникающих нормальных напряжений, действующих перпендикулярно нагрузке. Заkritическая несущая способность профиля не лимитируется потерей местной устойчивости в стенках и может быть кратно выше критической нагрузки, вызывающей потерю местной устойчивости [4, 10].

Основоположником теории заkritической несущей способности пластин принято считать Т. Кармана. Также большой вклад внесли такие ученые, как Г. Бак, А. С. Вольмир, Л. Доннел, Э. Шехлер, Л. Шуман и др. Проблемы заkritической несущей способности тонкостенных опор и балок рассматривались Я. Брудкой, Дж. Винтером, Р. Нидхемом, З. Терешковским, Дж. Хеймерлем, А. Чилвером и др. [4]. Среди ученых следует особо отметить Дж. Винтера, который внес огромный вклад в развитие теории заkritической несущей способности в ходе подготовки первых нормативных документов по расчету стальных холодногнутых тонкостенных профилей по заказу Американского института железа и стали (AISI), опираясь на масштабные экспериментальные исследования, проведенные в Cornell University. Под его руководством был издан первый нормативный документ по расчету тонкостенных холодногнутых конструкций «Specification for the Design of Light Gage Steel Structural Members», ставший основой при разработке нормативных документов в других странах.

Уравнение для нахождения критического напряжения в пластине имеет следующий вид [11]:

$$f_{cr} = \frac{k\pi^2 E}{12(1-\nu^2)(w/t)^2}, \quad (6)$$

где E — модуль упругости стали;

ν — коэффициент Пуассона;

k — коэффициент местной устойчивости пластин, который зависит от условий закрепления пластины;

w — ширина пластины;

t — толщина пластины.

После превышения критической нагрузки, приложенной на пластину, в ней начинают развиваться деформации, namного

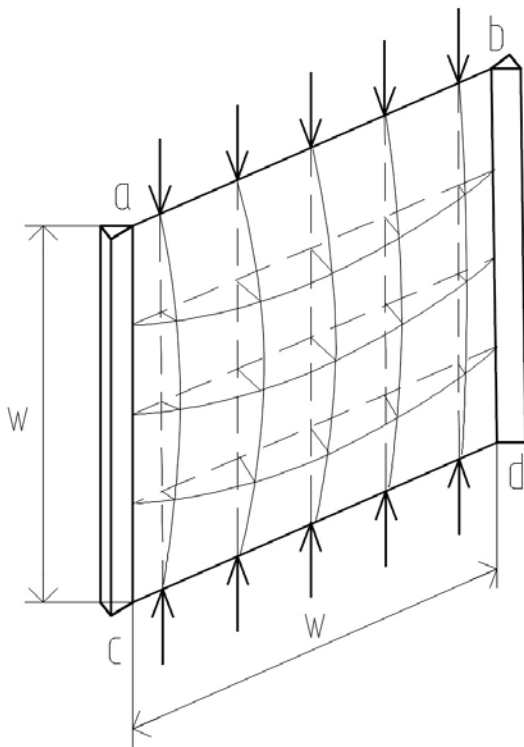


Рис. 2. Работа шарнирно опертой по двум
граням квадратной пластины в закритической
стадии

превосходящие ее толщину (рис. 2), напряжения начинают распределяться нелинейно.

Характер распределения напряжений на трех разных стадиях нагружения подкрепленной по двум граням пластины показан на рис. 3. Напряжения, не достигшие критиче-

ского значения, распределяются равномерно (рис. 3, а). После превышения критической нагрузки эпюра напряжений приобретает нелинейный вид: наибольшие напряжения наблюдаются в местах закрепления пластины, а в центре оказываются значительно меньшими (рис. 3, б). Дальнейший рост напряжений на краях происходит до достижения предела текучести стали (рис. 3, в) [12].

Впервые метод расчета тонких пластин при их работе в закритической стадии предложил Т. Карман в своей работе «The Strength of Thin Plates in Compression» [13]. По этому методу истинное распределение напряжений от внешней нагрузки по ширине w представляют в виде эквивалентных равномерно распределенных напряжений, приходящихся на участки равной ширины $b/2$, прилегающих к граням опирания пластины. Напряжения в средней части, наиболее подверженной потере местной устойчивости, принимают равными нулю и исключают из работы на внешнюю нагрузку. Результатом этих допущений является условная модель пластины, в которой на уменьшенную ширину, называемую совместно работающей, действуют равномерно распределенные нормальные напряжения величиной, равной пределу текучести для стали (рис. 4) [4, 7, 12, 14].

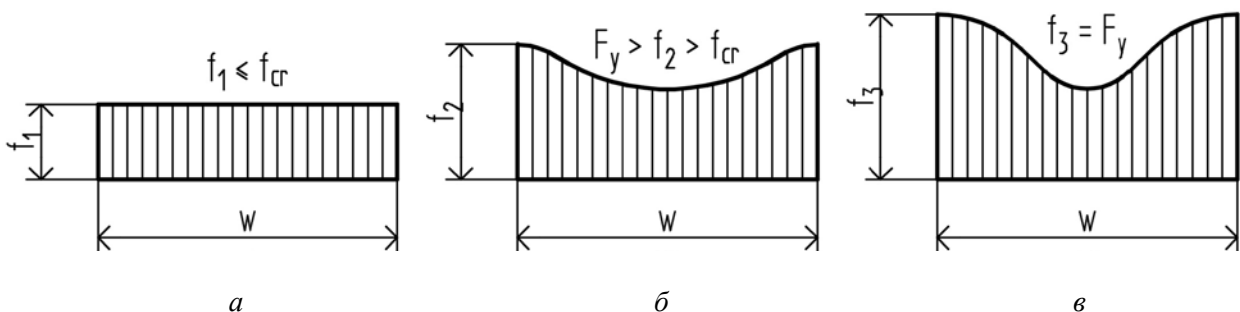


Рис. 3. Характер распределения напряжений в пластине с закрепленными полками
на трех разных стадиях нагружения

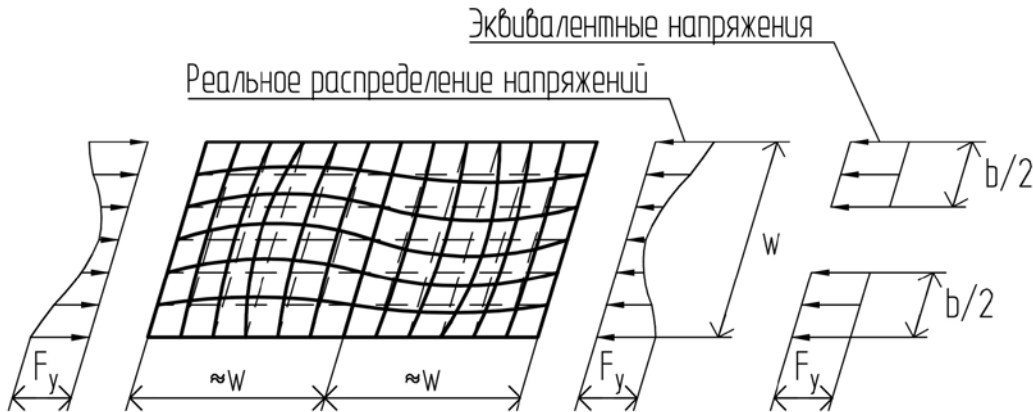


Рис. 4. Концепция эффективной ширины применительно к пластике

Предложенная Т. Карманом формула для закрепленной с двух сторон пластины имеет следующий вид [12]:

$$f_{cr} = F_y = \frac{\pi^2 E}{3(1-\nu^2)(b/t)^2}, \quad (7)$$

$$b = Ct \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 1,9t \sqrt{\frac{E}{F_y}}, \quad (8)$$

где

$$C = \frac{\pi}{\sqrt{3(1-\nu^2)}} = 1,9; \quad \nu = 0,3. \quad (9)$$

При $w > b$

$$f_{cr} = \frac{\pi^2 E}{3(1-\nu^2)(w/t)^2}, \quad (10)$$

$$w = Ct \sqrt{\frac{E}{F_y}}. \quad (11)$$

Из уравнений (8) и (11) следует, что

$$\frac{b}{w} = \sqrt{\frac{f_{cr}}{F_y}}. \quad (12)$$

В дальнейшем Дж. Винтер, основываясь на масштабных исследованиях, в ходе подготовки первой редакции американских

норм AISI по расчету холодногнутых тонкостенных элементов внес свое исправление в формулу (12), и она приобрела следующий вид (13):

$$\frac{b}{w} = \sqrt{\frac{f_{cr}}{f_{max}}} \left(1 - 0,25 \sqrt{\frac{f_{cr}}{f_{max}}} \right). \quad (13)$$

В следующей редакции американских норм AISI формула (13) была уточнена. Она приобрела вид, который сейчас имеет в современных европейских нормах Eurocode EN 1993-1-3 (14):

$$\frac{b}{w} = \sqrt{\frac{f_{cr}}{f_{max}}} \left(1 - 0,22 \sqrt{\frac{f_{cr}}{f_{max}}} \right). \quad (14)$$

Эффективная (приведенная) ширина пластины может быть определена по формуле:

$$b = \rho w, \quad (15)$$

где:

$$\rho = \frac{1 - 0,22 / \sqrt{f_{max} / f_{cr}}}{\sqrt{f_{max} / f_{cr}}} = \frac{1 - 0,22 / \lambda}{\lambda} \leq 1. \quad (16)$$

В формуле (17) λ — условная гибкость, которая определяется как:

$$\lambda = \sqrt{\frac{f_{cr}}{f_{max}}} = \sqrt{\frac{f_{cr} [12(1-\nu^2)(w/t)^2]}{k\pi^2 E}} = \left(\frac{1,052}{\sqrt{k}}\right) \left(\frac{w}{t}\right) \sqrt{\frac{f_{max}}{E}}. \quad (17)$$

В теории закритической несущей способности для тонкостенных холодногнутых стальных профилей различают следующие геометрические характеристики:

- характеристики сечения брутто;
- характеристики эффективного (редуцированного, приведенного) сечения [14].

При расчете тонкостенный профиль принимают состоящим из длинных пластин с жестким соединением в местахгиба. Принимается, что гибкость пластин достаточно большая, локальная потеря устойчивости происходит в стадии упругой работы материала [14].

Эффективное (редуцированное) сечение получают путем исключения из расчета неэффективных участков стенок профиля, теряющих локальную устойчивость при работе на внешнюю нагрузку. Геометрические характеристики редуцированного сечения, состоящего из отдельных эффективных участков плоских стенок профиля, определяются обычным способом и применяются при оценке несущей способности в зависимости от характера работы (сжатие, изгиб и т. д.). При определении несущей способности в случае сложного сопротивления эффективные характеристики необходимо определять для каждого силового фактора по отдельности и затем складывать полученные по отдельности напряжения. Редуцированное сечение используется также для учета потери устойчивости формы сечения [14, 16].

Использование эффективного сечения при расчетах приводит к изменению зна-

чальных геометрических характеристик и возникновению дополнительных напряжений, учитываемых путем ввода дополнительных понижающих коэффициентов к геометрическим характеристикам редуцированного сечения [14].

По теории закритической несущей способности, помимо возможности потери местной устойчивости, для тонкостенных холодногнутых конструкций допускается также потеря устойчивости формы, получаемая в результате поворота составных частей профиля в виде длинных плоских полос относительно мест их пересечения (местгиба). Потерю устойчивости формы также необходимо учитывать при выполнении расчетов [12].

Вопросы прочности и устойчивости в холодногнутых тонкостенных профилях решались при помощи экспериментальных исследований с выводом на их основе полуэмпирических формул. Отсутствие единообразия этих полуэмпирических формул для нахождения эффективных геометрических характеристик и сравнение получаемых результатов заставляют сделать вывод лишь о приближенности этих решений по отношению к реальной работе стенок профилей. Данные стенки являются упругозакрепленными пластинами со степенью закрепления, зависящей от геометрических характеристик профиля [4]. Поэтому для применения теории закритической несущей способности следует руководствоваться геометрическими соотношениями параметров поперечных сечений, для которых накоплен достаточный практический опыт.

Теория закритической несущей способности не является общим методом расчета, она справедлива для профилей, состоящих из плоских полос, соединенных под углом, близким к 90°. Однако этим условиям

удовлетворяет большинство профилей, широко применяемых в строительстве. При выполнении расчетов также необходима проверка бокового выпучивания (потери плоской формы изгиба) по теории В. З. Власова [4].

Сравнительный анализ методов расчета холодногнутых стальных тонкостенных профилей и области их применения

Можно выделить три следующих метода для расчета холодногнутых стальных тонкостенных профилей:

- теория призматического стержня;
- теория тонкостенного стержня В. З. Власова;
- теория закритической несущей способности.

По теории призматического стержня сплошного сечения расчет возможен только для тонкостенных профилей, работа которых носит характер осевого растяжения [4]. Только в этом частном случае характер работы тонкостенного профиля можно оценить с использованием гипотезы плоских сечений в соответствии с принципом Сен-Венана.

По теории тонкостенного стержня В. З. Власова расчет возможен для тонкостен-

ных профилей при таком характере работы, как внецентренное растяжение, внецентренное сжатие в двух плоскостях, изгиб в одной или двух плоскостях, потеря плоской формы при изгибе в одной плоскости, а также изгибное кручение. Выполняя расчеты по данной теории, необходимо проверять потерю местной устойчивости в стенках. При потере местной устойчивости применение гипотезы жесткого контура как единственного критерия работы будет некорректно, необходим также учет деформаций стенок, способных оказать существенное влияние на несущую способность [4].

По теории закритической несущей способности рассчитываются тонкостенные профили с такими характерами работы, как осевое/внецентренное сжатие и изгиб в одной из плоскостей. Необходимо также проверить отсутствие бокового выпучивания (потери плоской формы изгиба) [4].

На основании вышеизложенного критерии выбора теории расчета в зависимости от характера работы холодногнутых стальных тонкостенных профилей, а также необходимые проверки, не входящие в эти теории, сведены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. Область применения отдельных методов расчета холодногнутых стальных тонкостенных профилей в зависимости от характера работы

№ п/п	Название теории расчета	Характер работы профиля	Дополнительные проверки, не входящие в теорию
1	Теория призматического стержня	– осевое растяжение	—————
2	Теория тонкостенного стержня В. З. Власова	– внецентренное растяжение; – внецентренное сжатие в одной/ двух плоскостях; – изгиб в одной/двух плоскостях; – боковое выпучивание при изгибе в одной плоскости; – кручение с изгибом	– проверка потери местной устойчивости
3	Теория закритической несущей способности	– осевое/внецентренное сжатие; – изгиб в одной плоскости	– проверка потери плоской формы изгиба

Невзирая на абсолютное различие в подходах при расчете по теории тонкостенного стержня В. З. Власова и по теории закритической несущей способности, на практике прослеживается достаточное сходство в результатах оценки несущей способности при расчете холодногнутого стальных тонкостенных профилей на осевое и внецентренное сжатие в одной из плоскостей [4].

На практике широкое распространение получила прежде всего теория закритической несущей способности, которая легла в основу существующих нормативных документов по расчету холодногнутого стальных тонкостенных профилей. Уточнения полуэмпирических формул, вносимые на основе проводимых испытаний тонкостенных профилей, прослеживались в разных редакциях нормативных документов. При соблюдении соотношений геометрических параметров профилей, для которых накоплен опыт проектирования и расчета, существующие методики позволяют с достаточной точностью оценивать напряженно-деформируемое состояние. Простота используемых формул по сравнению с расчетами по В. З. Власову, требующими хорошего знания теории прочности и выполнения громоздких расчетов, снижает возможность допущения ошибки ввиду неучтенных особенностей работы профилей.

Заключение

Подобные конструкции в строительстве являются инновационными; как следствие, имеются пробелы в нормативной и методической базах по их расчету. До того как были введены российские нормы проектирования СП 260.1325800.2016 «Конструкции стальные тонкостенные из холодногнутого оцинкованных профилей и гофрированных листов. Правила проектирования», область приме-

нения холодногнутого профилей в России ограничивалась сооружениями, проектная документация которых не требовала прохождения обязательной государственной экспертизы. Данное ограничение во многом было связано с отсутствием действующих нормативных документов на территории Российской Федерации и общепринятых методик расчета, а не с прочностными качествами самих профилей [15]. Проектирование вели с использованием иностранных нормативных документов и соответствующего опыта применения подобных конструкций.

В основе многих разделов СП 260.1325800.2016 лежат европейские нормы проектирования Eurocode EN 1993-1-3, опирающиеся на теорию закритической несущей способности. Предлагаемые методики, основанные на приближенных полуэмпирических формулах для расчета холодногнутого профилей, полученных в результате экспериментальных исследований, не соответствуют некоторым принципам строительной механики. Данное обстоятельство может привести к ошибкам при оценке несущей способности [16]. Стоит упомянуть, что данный свод правил, как и СП 16.13330.2017 «Стальные конструкции», не распространяет свое действие на конструкции мостов. Мосты необходимо проектировать исходя из требований СП 35.13330.2011 «Мосты и трубы», в котором в списке применяемых материалов тонкостенные стальные холодногнутые открытые профили отсутствуют, как и методика по их расчету [17]. Также необходим пересмотр требований, предъявляемых к минимальной толщине металла с точки зрения как толщины самих профилей, так и толщины крепежных фасонки, оказывающейся значительно завышенной для конструкций из тонкостенных профилей. Новые технологии

зачастую приходят в область мостостроения после наработки успешного опыта в других областях строительства ввиду повышенной ответственности и повышенных требований к мостовым сооружениям.

Вышеперечисленные факторы значительно затрудняют проектирование и ограничивают применение холодногнутого тонкостенных стальных профилей в мостовых конструкциях. На сегодняшний день до сих пор не разработаны технико-конструктивные решения несущих конструкций мостовых сооружений с использованием холодногнутого тонкостенных профилей. Данные конструкции уже успешно себя зарекомендовали и доказали свою эффективность в области сельскохозяйственного, промышленного, гражданского и других сфер строительства. Они могут стать альтернативой широко применяемым и распространенным конструкциям в мостостроении (деревянными, железобетонными, классическим стальными конструкциям, конструкциям из композитных материалов) и оптимальным решением при технико-экономическом обосновании в определенных условиях с учетом их особенностей, достоинств и недостатков.

Считается, что данные конструкции не предназначены для конструкций с ярко выраженными динамическими нагрузками [4]. Поэтому на первых этапах применения холодногнутого профилей в мостовых конструкциях будет целесообразно рассмотреть пешеходную нагрузку в качестве временной. Успешная апробация применения тонкостенных холодногнутого стальных профилей в основных конструкциях пешеходных мостов позволит рассмотреть использование данных конструкций под нагрузки от транспортных средств, при воздействиях которых необходимо учитывать усталостную долговечность.

Для успешного внедрения подобных конструкций в качестве несущих при строительстве мостовых сооружений необходимо разработать общепринятую методику по расчету подобных конструкций применительно к мостостроению. Ввиду сложности работы данных конструкций на внешнюю нагрузку, которую необходимо учитывать при их расчете и проектировании, целесообразно разработать ряд типовых решений для стандартных пролетов, позволяющих перекрывать наиболее распространенные преграды и транспортные пересечения, что значительно снизит затраты на проектирование и поспособствует широкому применению холодногнутого стальных тонкостенных профилей в несущих конструкциях мостовых сооружений.

Библиографический список

1. Тухарели В. Д., Тухарели А. В., Чередниченко Т. Ф. Строительство зданий с использованием легких металлических конструкций: учеб. пособие. Волгоград: Волгоградский государственный технический университет, 2018. 132 с.
2. Ведяков И. И., Одесский П. Д. Современные отечественные стандарты и вопросы расширения применения металлических конструкций в строительстве // Вестник НИЦ «Строительство», 2019. № 3 (22). С. 42–53.
3. Власов В. З. Тонкостенные упругие стержни. М.: Физматгиз, 1959. 568 с.
4. Брудка Я., Лубиньски М. Легкие стальные конструкции. Изд. 2-е, доп. / пер. с польск.; под ред. С. С. Кармилова. М.: Стройиздат, 1974. 342 с.
5. Пособие по проектированию строительных конструкций малоэтажных зданий из стальных холодногнутого оцинкованных профилей (ЛСТК) [Электронный ресурс] / под ред. Т. В. Назмеевой. Санкт-Петербург: Первый ИПХ, 2021. 238 с.

6. Зеньков Е.В. Особенности работы стоечного профиля из легких стальных тонкостенных конструкций на устойчивость // Международный научно-исследовательский журнал. 2021. № 3-1 (105). С. 54–59.
 7. Рыбаков В. А. Основы строительной механики легких стальных тонкостенных конструкций. СПб: СПбГПУ, 2015. 207 с.
 8. СП 16.13330.2017. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23–81*. М., 2017. 140 с.
 9. СНиП II-23–81*. Стальные конструкции / Госстрой СССР. М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1990. 96 с.
 10. Нехаев Г.А. Легкие металлические конструкции. Тула: Издатель ООО «ПрофСтальПрокат», 2012. 93 с.
 11. Yu W.-W., LaBoube R.A. Cold-formed steel design: fourth edition. New York: John Wiley & Sons Inc., 2010. 491 p.
 12. Семко В. А. Расчет несущих и ограждающих конструкций из стальных холодноформованных профилей в соответствии с Еврокодом 3. Киев: Украинский Центр Стального Строительства (УЦСС), 2015. 143 с.
 13. Karman T. von, Sechler E.E., Donnell L.H. The Strength of Thin Plates in Compression // Transactions, Applied Mechanics Division. 1932. P. 53–57.
 14. Расчет элементов из стальных холодноформованных профилей в соответствии с Еврокодом 3 / Э. Уэй и др. // Украинский Центр Стального Строительства, 2015. 102 с.
 15. Ватин Н.И., Синельников А.С. Большепролетные надземные пешеходные переходы из легкого холодногнутого стального профиля // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2012. № 1. С. 47–52.
 16. Смирнов М. О. Прочность и устойчивость стержневых элементов конструкций из холодногнутого профилей с фактически редуцированным сечением: дисс. ... канд. техн. наук: 2.1.1. СПб.: СПбГАСУ, 2021. 157 с.
 17. СП 35.13330.2011. Мосты и трубы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.03–84*. М., 2011. 341 с.
- Дата поступления: 25.05.2024
Решение о публикации: 09.07.2024

Контактная информация:

СОЛОВЬЕВ Николай Андреевич — аспирант;

nikolai_solovev@yahoo.com

ЧИЖОВ Сергей Владимирович — канд. техн.

наук, доцент; sergchizh@yandex.ru

АВДЕЙ Юлия Владимировна — канд. пед. наук,

доцент; avdej_yuliya@yandex.ru

Methodological justification for the calculation of cold-formed steel thin-walled profiles in bridge structures at the project stage

N. A. Solovev, S. V. Chizhov, Yu. V. Avdey

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russia

For citation: Solovev N. A., Chizhov S. V., Avdey Yu. V. Methodological justification for the calculation of cold-formed steel thin-walled profiles in bridge structures at the project stage // Proceedings of Petersburg Transport University. 2024. Vol. 21, iss. 3. P. 622–637. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2024-03-622–637

Abstract

Objective: perform a comparative analysis of the features of existing theories for calculating cold-formed steel thin-walled profiles, consider the need to develop a calculation methodology and justify the criteria for the applicability of cold-formed steel thin-walled profiles in the main structures of bridge structures, justify the feasibility of using structures from thin-walled cold-formed profiles in relation to bridge construction in order to reduce metal consumption and increase economic efficiency. **Methods:** a comparison of existing theories for calculating cold-formed steel thin-walled profiles at the moment, a review of the existing practice of application and technical and economic indicators of thin-walled profiles in the field of industrial and civil construction. **Results:** a comparative analysis of the features, advantages and disadvantages of individual theories for calculating cold-formed steel thin-walled profiles has been carried out, criteria for choosing a calculation theory depending on the nature of their work have been established. Some technical and economic indicators of similar structures made of cold-formed steel thin-walled profiles in the structures of buildings for industrial, civil, agricultural and other purposes are presented. The analysis showed that these structures have lower metal consumption compared to conventional steel structures. **Practical importance:** the need to develop a methodology for calculating structures made of cold-formed steel thin-walled profiles in relation to bridge construction is identified. This technique has practical significance for the implementation of thin-walled profiles in the main structures of bridges. A number of factors are given that may be decisive in favor of choosing cold-formed steel thin-walled profiles as part of the load-bearing structures of the main beams of bridges with an appropriate feasibility study in certain conditions, taking into account their features, advantages and disadvantages.

Keywords: cold-formed thin-walled steel profile, LGSF, Vlasov theory, theory of supercritical load-bearing capacity, buckling, bimoment, local stability, pedestrian bridge

References

1. Tuhareli V.D., Tuhareli A.V., Cherednichenko T.F. Stroitel'stvo zdaniy s ispol'zovaniem legkih metallicheskiy konstrukcij: ucheb. posobie. Volgograd: Volgogradskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet, 2018. 132 s. (In Russian)
2. Vedyakov I.I., Odesskij P.D. Sovremennye otechestvennye standarty i voprosy rasshireniya primeneniya metallicheskih konstrukcij v stroitel'stve // Vestnik NIC "Stroitel'stvo". 2019. № 3 (22). S. 42–53. (In Russian)
3. Vlasov V.Z. Tonkostennye uprugie sterzhni. M.: Fizmatgiz, 1959. 568 s. (In Russian)
4. Brudka Ya., Lubin'ski M. Legkie stal'nye konstrukcii. Izd. 2-e, dop. / per. s pol'sk.; pod red. S.S. Karmilova. M.: Strojizdat, 1974. 342 s. (In Russian)
5. Posobie po proektirovaniyu stroitel'nyh konstrukcij maloetazhnyh zdaniy iz stal'nyh holodnog-nutyh ocinkovannyh profilej (LSTK) [Elektronnyj resurs] / pod. red. T.V. Nazmeevoj. Sankt-Peterburg: Pervyj IPH, 2021. 238 s. (In Russian)
6. Zen'kov E.V. Osobennosti raboty stoechnogo profilya iz lyogkih stal'nyh tonkostennyh konstrukcij na ustojchivost' // Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal. 2021. № 3-1 (105). S. 54–59. (In Russian)
7. Rybakov V.A. Osnovy stroitel'noj mekhaniki legkih stal'nyh tonkostennyh konstrukcij. SPb: SPbG-PU, 2015. 207 s. (In Russian)
8. SP 16.13330.2017. Stal'nye konstrukcii. Aktualizirovannaya redakcija SNiP II-23–81*. M., 2017. 140 s. (In Russian)
9. SNiP II-23–81*. Stal'nye konstrukcii / Gosstroj SSSR. M.: CITP Gosstroya SSSR, 1990. 96 s. (In Russian)
10. Nekhaev G.A. Legkie metallicheskie konstrukcii. Tula: Izdatel' OOO "ProfStal'Prokat", 2012. 93 s. (In Russian)
11. Yu W.-W., LaBoube R.A. Cold-formed steel design: fourth edition. New York: John Wiley & Sons Inc., 2010. 491 p.
12. Semko V.A. Raschet nesushchih i ograzhdayushchih konstrukcij iz stal'nyh holodnoformovannyh

profilej v sootvetstvii s Evrokodom 3. Kiev: Ukrainskij Centr Stal'nogo Stroitel'stva (UCSS), 2015. 143 s. (In Russian)

13. Karman T. von, Sechler E. E., Donnell L. H. The Strength of Thin Plates in Compression // Transactions, Applied Mechanics Division. 1932. P. 53–57.

14. Raschet elementov iz stal'nyh holodnoformovannyh profilej v sootvetstvii s Evrokodom 3 / E. Uej i dr. // Ukrainskij Centr Stal'nogo Stroitel'stva, 2015. 102 s. (In Russian)

15. Vatin N. I., Sinel'nikov A. S. Bol'sheproletnye nadzemnye peshkhodnye perekhody iz legkogo holodnognutogo stal'nogo profilya // Stroitel'stvo unikal'nyh zdaniy i sooruzhenij. 2012. № 1. S. 47–52. (In Russian)

16. Smirnov M. O. Prochnost' i ustojchivost' sterzhnevyyh elementov konstrukcij iz holodnognutyyh pro-

filej s fakticheski reducirovannym secheniem: diss. ... kand. tekhn. nauk: 2.1.1. SPb.: SPbGASU, 2021. 157 s. (In Russian)

17. SP 35.13330.2011. Mosty i truby. Aktualizirovannaya redakciya SNiP 2.05.03–84*. M., 2011. 341 s. (In Russian)

Received: 25.05.2024

Accepted: 09.07.2024

Author's information:

Nikolai A. SOLOVEV — Postgraduate Student;
nikolai_solovev@yahoo.com

Sergey V. CHIZHOV — PhD in Engineering,
Associate Professor; sergchizh@yandex.ru

Yuliya V. AVDEY — PhD in Pedagogy, Associate
Professor; avdej_yuliya@yandex.ru