

личных элементов и узлов монолитных каркасов, учитывающие мировой опыт монолитного домостроения и позволяющие выбирать оптимальные конструктивные решения в конкретной проектной ситуации. В частности, у проектировщиков возникают проблемы с расчетом и конструированием узлов сопряжения окаймляющих элементов по контуру перекрытия, в том числе с крайними колоннами и т.д.

Существует настоятельная необходимость в разработке и практическом внедрении программных комплексов, в полной мере реализующих положения действующих норм проектирования [6], а также в разработке практических рекомендаций в развитие стандарта СТБ EN 13791 по правилам оценки прочности бетона в существующих конструкциях [7].

По видимому, следует вернуться к более широкому использованию индустриального изготовления арматурных изделий на предприятиях стройиндустрии, расширению использования сварки при образовании пространственных каркасов в построечных условиях, хотя бы для замыкания хомутов контактной точечной сваркой и т.п. Думается, что предлагаемые мероприятия позволят повысить качество и надежность конструкций.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Казачек, В.Г. Здания и сооружения: не допустить аварии при строительстве и эксплуатации // Инженер-консультант в строительстве, 2002. – № 19.
2. Казачек, В.Г. Некоторые проблемы проектирования и возведения колонн монолитных железобетонных зданий / В.Г. Казачек, А.Е. Шилов, // Главный инженер в строительстве, 2014. – № 8(20). – С. 10–15.
3. Монолитные бетонные и железобетонные конструкции. Правила возведения: ТКП 45-5.03-131-2009 (02250). – Мн.: МАиС, 2013.
4. Бетонные работы при отрицательных температурах воздуха. Правила производства: ТКП 45-5.03-21-2006. – Мн.: МАиС, 2006.
5. Строительство. Возведение монолитных бетонных и железобетонных конструкций. Номенклатура контролируемых показателей качества. Контроль качества работ: СТБ 1958-2009.
6. Бетонные железобетонные конструкции: СНБ 5.03.01-02 / МАиС РБ.– Минск: РУП «Минсктиппроект», 2003. – 144 с.
7. Оценка прочности на сжатие бетона в конструкциях и сборных элементах конструкций: СТБ EN 13791-2012.

УДК 624.078.4:001.8

Шумейко К.О., Семко А.В.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ БОЛТОВЫХ И ВИНТОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ В ТОНКОСТЕННЫХ КОНСТРУКЦИЯХ ПРИ СРЕЗЕ, ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

Постановка проблемы в общем виде

В стальных строительных конструкциях существует два основных типа профилей – горячекатаные и холодноформированные. С активным развитием строительной индустрии Украины все больше получают распространение легкие стальные тонкостенные профили (ЛСТП), следует отметить широкое использование холодноформированных профилей в строительстве для сельского хозяйства, в виде силосов и бункеров для хранения и обработки зерна, индивидуального коттеджного строительства, реконструкции жилых и общественных зданий. Конструкции с ЛСТП привлекают к себе внимание тем, что они быстро монтируются, не требуя сложных и дорогостоящих фундаментов, небольшие затраты на подъемно-транспортные механизмы, умеренные транспортные рас-

ходы, возможна комплексная заводская поставка конструкций. В мировой практике данные конструкции известны с начала XX-го века, а на территории Украины, Белоруссии и России свое стремительное развитие начали 10 лет назад и заняли свой сегмент строительного бизнеса. Учитывая широкую сферу применения данных профилей и элементов, возникает вопрос об их методах соединения. Соединение является важной частью в любых конструкциях, не только с точки зрения их роботы. В несущих и ограждающих конструкциях с помощью различных способов крепления осуществляется соединение профилей между собой. Важным вопросом, который возникает перед конструктором-проектировщиком, является выбор оптимального типа крепежных элементов в соединениях легких тонкостенных конструкций и их расчет. Возникает вопрос нормирования проектирования данных конструкций. Перенимая опыт зарубежных нормативных документов в Украине, как и в Белоруссии, приняты Еврокоды для расчета и проектирования конструкций из ЛСТП.

Целью данной работы является приведение результатов экспериментально-теоретического исследования болтовых и винтовых соединений ЛСТП, используя результаты эксперимента, представить результаты оценки частичного коэффициента безопасности по материалу γ_{M2} .

Изложение основного материала

Цель проведения экспериментальных исследований в рамках данной работы – получение данных о несущей способности, деформативности, особенности работы и отказа соединений элементов ЛСТП на болтах и самосверлящих самонарезающих винтах. В исследованиях использовались образцы со следующими характеристиками: толщины образцов для испытания приняты равными 0,75; 1,0, 1,5, 2,0 мм, как основные толщины, применяемые для формирования элементов из ЛСТП; размеры образцов принимались согласно ECCS TC7 TWG 7.10 [2]; ширина пластин принята равной 50 мм, длиной 300 мм. В качестве исследуемых крепежных элементов были приняты болты M10 класс прочности 5.8 и болты M10 класс прочности 8.8, шайбы диаметром 20 и 30 мм, и самосверлящие самонарезающие винты $d = 5,5$ мм, данные виды крепежных элементов получили наиболее широкое применение в легких стальных тонкостенных конструкциях. Ширина пластин подобрана таким образом, чтобы разрушение проходило по смятию базового материала или по срезу крепежного элемента тем самым избегая разрушения по сечению нетто и отколу хвостовой части листа соединяемых элементов, предпосылки расчета приведены в нормативе [3].

Программа эксперимента включает испытания двух серий образцов, приведенных в таблице 1.

Таблица 1 – Серии образцов

Болтовые соединения	Винтовые соединения
1 серия (B1, B1ш, S1) (B – болты, S – самонарезающих самосверлящих винтов, 1 - серия испытаний, ш - широкие шайбы)	
Одноболтовые соединения элементов различных толщин с использованием шайб $d_{ш} = 20$ мм и $d_{ш} = 30$ мм, без использования шайб. Болты класс прочности 5.8 M10	Одновинтовые соединения элементов различных толщин с использованием: самонарезающих самосверлящих винтов $d = 5,5$ мм
2 серия (B2, S2) (B – болты, S – самонарезающих самосверлящих винтов, 2 - серия испытаний)	
Одноболтовые соединения элементов различных толщин с использованием шайб $d_{ш} = 20$ мм и $d_{ш} = 30$ мм, без использования шайб. Болты класс прочности 8.8 M10	Двухвинтовые соединения элементов различных толщин с использованием: самонарезающих самосверлящих винтов $d = 5,5$ мм (горизонтально и вертикальное расположение винтов в соответствии с приложенной нагрузкой)

Последовательно рассмотрим работу соединения при срезе крепежа и смятии материала. На начальной стадии приложения нагрузки к соединению наблюдается участок упругой работы для винтовых соединений, а для болтовых соединений наблюдается зона выбора зазоров, образована разницей диаметров болта и отверстия, выполненного в базовом материале, после которой идет участок упругой работы соединения. Далее происходит стремительный переход в стадию упруго-пластических деформаций. После этой стадии при разрушении по материалу соединяемых элементов следует площадка текучести, переходящая в стадию самоупрочнения, смятия листа, достижения предела прочности соединения и окончательным отказом соединения. В случае разрушения по крепежным элементам четко выраженной площадки текучести практически не наблюдается, упругая стадия переходит в стадию самоупрочнения с последующим достижением предела прочности крепежа, это происходит в том случае, когда материал соединяемых элементов значительно прочнее, чем материал крепежного элемента, т.е. истощения предела прочности крепежа наступает раньше смятия соединяемых элементов. Отказ соединения по смятию сопровождается при этом значительными пластическими деформациями. Отказ по срезу крепежных элементов носит хрупкий характер.

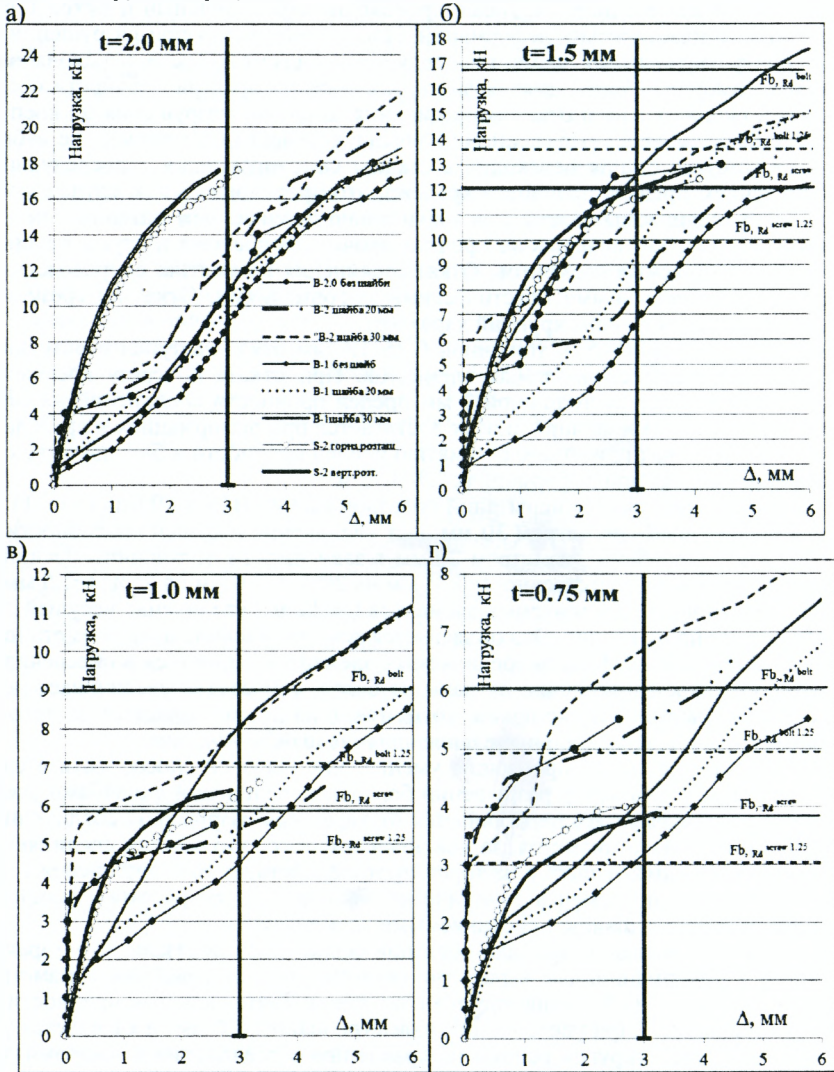
В образцах серии «S1» толщиной 0,75–1,5 мм отказ наступал в результате смятия материала соединяемых элементов. При отказе по срезу крепежных элементов в образцах толщиной 2 мм предел прочности соединений на самосверлящих самонарезающих винтах достигается при деформациях в пределах 2 мм, в то время как при отказе по смятию предел прочности в большинстве случаев наблюдается при деформациях 1,7–3,75 мм.

Сравнивая результаты испытаний образцов серии «B1» и «B1ш» (рис. 1) использование шайб диаметром 30 мм дает увеличение несущей способности по сравнению с шайбами диаметром 20 мм в зависимости от толщины соединяемых элементов соответственно: $t=0,75$ мм на 20%; $t=1,0$ мм на 25%; $t=1,5$ мм на 19%. При толщине соединяемых элементов $t = 2,0$ мм увеличение несущей способности не происходило. Это объясняется тем, что увеличенный диаметр шайбы не дает свободной части соединяемых элементов сминаться и обеспечивает дополнительное закрепление от наклона болта, тем самым увеличивает несущую способность, в то же время, когда толщина листа возрастает до того же порядка, что и шайба, дополнительное влияние шайбы исчезает.

В образцах без шайб произошло уменьшение несущей способности в среднем на 22–25%. Характер разрушений болтовых соединений с шайбами увеличенного диаметра почти не отличается от характера разрушения соединений с шайбами обычного диаметра, за исключением того, что кромки соединяемых элементов обжимают шайбу, которая противодействует наклону крепежа. Наклон крепежного элемента практически незаметен в результате увеличения площади контакта шайбы с соединяемыми элементами.

Результаты исследований для образцов серии «B2» показали, что характер работы и деформационные характеристики соединений с шайбами диаметром 20 мм и соединений без шайб при использовании болтов классом прочности 8.8 почти одинаковы. При увеличенном диаметра шайбы (30 мм) наблюдается увеличение участка упругой работы по сравнению с соединений с шайбами диаметром 20 мм. Однако в образцах толщиной 2,0 мм деформативность соединения почти одинакова для всех трех вариантов соединения. Проводя сравнение деформационного поведения болтовых соединений с болтами класс прочности

5.8 и болтами класса прочности 8.8 с предварительным натягом, можно сказать, что предварительный натяг болтов дает значительное повышение несущей способности и уменьшения деформативности для образцов толщиной 0,75 мм и 1 мм, значительно увеличивается стадия упругой работы соединения, этот эффект нивелируется при увеличении толщины элементов.



а) элементов, толщиной 2,0 мм; б) элементов, толщиной 1,5 мм;
в) элементов, толщиной 1,0 мм; г) элементов, толщиной 0,75 мм
Рисунок 1 – Сравнение результатов испытания соединений 1-й и 2-й серий

Результаты испытания серии «S2» при разных толщинах элементов показали несущую способность почти одинакова. Отличие заключается в деформативности соединений из-за последовательности включения в работу винтов при параллельном расположении винтов по направлению к приложенной нагрузке, деформативность данных образцов ниже при действии одинаковой нагрузки по сравнению с перпендикулярным расположением винтов.

В результате проведенного эксперимента для 1-й и 2-й серий образцов с толщинами 0,75 мм, 1,0 мм и 1,5 мм основной формой отказа является смятие, а для всех серий в образцах 2,0 мм преимущественно происходил срез крепежного элемента.

Руководствуясь рекомендациями по планированию и обработке результатов эксперимента по нормативным документам [2, 3], результаты усредненных показателей эксперимента по сериям испытанных образцов на рисунке 1 сравниваются с теоретически рассчитанной несущей способностью при смятии $F_{b,Rd}$ по EN 1993-1-3:2006 [3], как основная форма отказа в соединениях из ЛСТП. Соответственно на рисунке 1 нанесена теоретическая несущая способность при смятии болтового соединения $F_{b,Rd}^{bolt}$ и $F_{b,Rd}^{screw}$ винтового соединения, в расчете принято значение коэффициента надежности по материалу $\gamma_{M2} = 1,0$, и теоретическое значение при значении коэффициента надежности по материалу $\gamma_{M2} = 1,25 - F_{b,Rd}^{bolt 1,25}$, $F_{b,Rd}^{screw 1,25}$ как рекомендовано в нормативе [3]. Как видно на графиках «нагрузка/деформации» (рис. 1 б, в, г), для болтовых соединений коэффициент надежности 1,25 не обеспечивает необходимый уровень несущей способности при предельной деформации 3 мм, которая допускается для соединений в нормативе [2].

Для оценки необходимого уровня коэффициента безопасности по материалу γ_{M2} проведен расчёт по разработанному алгоритму Frans Bijlaard [1] для EN 1990 [4]. Его методика использует метод предельных состояний, что позволило учитывать специфику работы различных конструкций и фактическую изменчивость нагрузок и механических свойств строительных материалов, а также некоторые другие обстоятельства, характеризующие работу различных конструкций. Внедрение метода предельных состояний позволило достичь выравнивания надежности отдельных элементов конструкции, составляющих одно целое. Метод основан на статистическом изучении нагрузок, механических свойств, условий работы конструкций и материалов.

Частичный коэффициент безопасности рассчитывается по следующей формуле:

$$\gamma_{M2} = \frac{r_k}{r_d}, \quad (1)$$

r_d – расчетное значение сопротивления; r_k – нормативное значение сопротивления; r_m – сопротивление, определенное на основе средних значений массива базисных величин; \bar{X}_m – базисных величин; r_t – теоретическое значение сопротивления, определяется на основе функций $g_n(\bar{X})$ и $g_m(\bar{X})$.

Расчетная модель для теоретической величины сопротивления r_t рассматриваемого элемента конструкции представлена функцией сопротивления:

$$r_t = g_n(\bar{X}) = g_n(\alpha, t, d, f_u) \quad (2)$$

Функция сопротивления должна охватывать все базовые переменные \bar{X} , влияющие на сопротивление соответствующего предельного состояния. Фактические измеренные параметры подставляются в функцию сопротивления для определения теоретических значений $r_{ti} = F_{b,Rb}$, которые затем сравнивают с экспериментальными значениями r_{ei} . Алгоритм расчета коэффициента надежности представлен в приложении D [4].

Для обоснования значения коэффициента надежности работы соединения по материалу на винтах и болтах были использованы результаты собственных исследований проведенных в ПолтНТУ, и результаты зарубежных исследователей [5–7]. Результаты испытаний и статистической обработки полученных результатов свидетельствуют о том, что необходимо повысить значение коэффициента надежности γ_{M2} для соединений на болтах (таблицу 2) до значения 1,35. Также обработка результатов показала, что для винтов достаточно значение коэффициента надежности $\gamma_{M2} = 1,25$ (таблица 3).

Таблица 2 – Расчетные показатели γ_{M2} для болтов

	Диаметр болта, мм	Толщина материалов, мм		f_u Н/мм	γ_{M2}
Шумейко, Семко [8, 9]	10	0.75	0.75	393	1.31
	10	1	1	395	1.36
	10	1.5	1.5	446	1.36
Chong, [5]	11.78	0.94	0.94	406	1.35
Chong, [5]	11.11	1.3	1.3	346	1.34
Zhang, [6]	14.3	0.76	0.76	398	1.38
Ср.знач.					1.35

Таблица 3 – Расчетные показатели γ_{M2} для винтов

	Толщина материалов, мм		f_u Н/мм	γ_{M2}
Шумейко Семко [8, 9]	0.75	0.75	393	1.24
	1	1	395	1.15
	1.5	1.5	446	1.15
Катранов [7]	0.55	0.55	369	1.26
	0.7	0.7	354	1.22
	1.0	1.0	357	1.23
	1.2	1.2	348	1.26
	1.5	1.5	345	1.12
Ср.знач.	1.2			

Выводы

В Еврокоде остаются открытыми пункты для внесения изменений в национальное приложение к EN 1993-1-3 [3], один из них – это нормирование коэффициента надежности по материалу γ_{M2} , следует отметить, что за базовый уровень значение принято 1.25. Результаты испытаний и статистической обработки полученных результатов свидетельствуют о том, что необходимо повысить значение коэффициента надежности γ_{M2} для соединений на болтах при расчете по критической форме отказа, смятие основного металла, как основная для соединений в холодноформированных конструкциях до значения $\gamma_{M2}=1.35$.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Bijlaard F. Eurocode 3: Design of steel structures – Present status and further developments / Frans Bijlaard // Steel Construction. – 2008. – № 1, Issue 1. – P. 16–23.
2. ECCS TC7 TWG 7.10 The testing of connections with mechanical fasteners in steel sheeting and sections, European recommendations for steel construction. ECCS publication no.124. Portugal, 2009. – 66 p.
3. EN 1993-1-3. Eurocode 3: Design of steel structures Part 1-3, General rules – Supplementary rules for cold-formed members and sheeting, 2006, – 127 p.
4. EN 1990:2002. Basis of Structural Design, 2002, – 117 p.
5. Chong K.P. Light-Gage Steel Bolted Connections without Washers / K.P. Chong, R. B. Matlock, // Journal of the Structural Division, ASCE. – 1974, Vol 101, No. ST7, – P. 623-638.
6. Zhang J. Structural behavior of washerless bolted connections in shear / Thesis, McGill University, Canada 2002, – 290 p.
7. Катранов, И.Г. Несущая способность винтовых и заклепочных соединений стальных тонкостенных конструкций: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / Катранов И.Г. – М., 2011. – 202 с.
8. Шумейко, К.О. Экспериментальные исследования работы болтовых соединений у легких стальных тонкостенных конструкциях / К.О. Шумейко, О.В. Семко // Сборник научных трудов «Современные строительные конструкции из металла и древесины». – № 17 – Одесса: ОГАСА, ООО «Внешрекламсервис», 2013. – С. 218–223.
9. Шумейко, Е.А. Экспериментальные исследования работы и типов отказов соединений в тонкостенных конструкциях / Е.А. Шумейко, А.В. Семко, Т.Н. Нестеренко, С.П. Лебединский // Строительство: проблемы и перспективы: сборник статей по материалам международной научно-практической конференции 29–30 марта 2013 г. – Махачкала: ДПИHX, 2013. – С. 262–265.