

Несущая способность усиленных узлов стальных ферм из гнутосварных профилей на продавливание

Ш.М. Мамедов, Т.С. Хегай, А.Е. Кубасевич, А.В. Ковалевский

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

Аннотация: Одним из методов усиления узлов стальных ферм из гнутосварных профилей является использование листовых накладок. В данной статье показано их влияние на увеличение прочности узлов по критерию на продавливание. Исследования проводились с применением компонентного метода конечных элементов. Показаны полученные зависимости увеличения несущей способности в зависимости от ширины раскоса и его угла примыкания. Разработана инженерная методика оценки прочности усиленного узла на продавливание с применением традиционной формулы из российских норм проектирования с заменой толщины пояса на приведенную.

Ключевые слова: усиление, узлы, гнутосварные профили, несущая способность, продавливание.

Введение

Среди большинства проектируемых металлических ферм в настоящее время широкое распространение получили фермы из гнутосварных профилей (ГСП), которые являются весьма экономичными благодаря отсутствию фасонных элементов крепления поясов и раскосов [1-3]. Узлы ферм такого типа проверяются на прочность при продавливании (вырывании) полков поясов, устойчивость боковых стенок поясов в местах примыкания раскосов, прочность элементов решеток и сварных швов. Напряженно-деформированные состояния узлов ферм из ГСП анализируются в работах различных отечественных [4-6] и зарубежных [7-9] авторов. Методика и результаты экспериментальных исследований соединений из гнутосварных профилей приведены в работах [10-11]. Важно отметить, что при существенных значениях внутренних усилий несущая способность узлов исчерпывается ранее, чем несущая способность поясов или раскосов, что может приводить к увеличению сечений и стоимости ферм из ГСП. При невыполнении проверки на продавливание (вырывание) одним из способов усиления поясов является использование листовых накладок (рис.1). При

этом следует заметить, что в действующих нормах проектирования (СП 294.1325800.2017 Конструкции стальные. Правила проектирования. М.: Минстрой России, 2017. 167 с.) отсутствуют проверки узлов ферм, которые учитывают влияние листовых накладок на увеличение прочности на продавливание (вырывание).

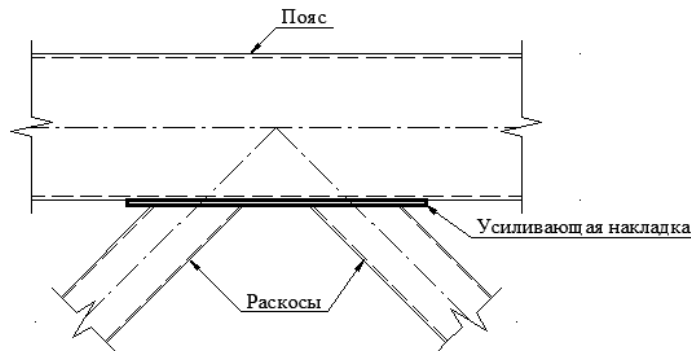


Рис. 1. – Узел фермы из ГСП с листовой накладкой

В настоящей работе приводятся результаты исследований влияния листовых накладок на несущую способность узлов ферм из ГСП по критерию прочности на продавливание, которые могут быть использованы при их проверках.

Методы

В данной статье решение поставленной задачи базируется на применении компонентного метода конечных элементов [12, 13], реализованного в программном комплексе IDEASTaTiCa Connection. Результаты исследований сравниваются с расчетами по методикам, представленным в отечественных нормах СП 294, зарубежных нормах EN 1993-1-8 (Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-8: Design of joints. ENV 1993-1-1:1992 / European committee for standartization. Brussels: CEN, 2005. 135 p.) и с данными расчетов методом конечных элементов с использованием ПО ANSYS.

Результаты

Численные исследования проводились для нескольких типов узлов ферм из гнутосварных профилей (ГСП), геометрические параметры которых были приняты с учетом анализа наиболее применяемых сечений. Всего для расчетов было принято три типа «У»-образных узлов (как наиболее нагруженных с точки зрения влияния на продавливание полки) с одинаковыми поясами сечением из ГСП 180x140x5 и раскосами в виде ГСП 80x3, 90x3 и 100x3 ($b_p/b_n=0,57\dots0,71$). Исследования узлов проводились как без усиления, так и с использованием накладок из листовой стали, толщина которых во всех расчетах принималась одинаковой и составила $t=6$ мм. Материал элементов стальных конструкций – сталь класса С255 (диаграмма работы материала показана на рис.2), материал для сварки – сварочная проволока Св08Г2С.

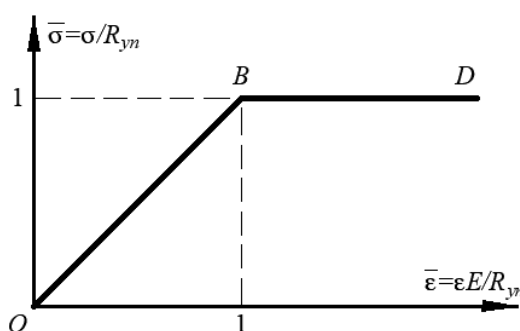


Рис. 2. – Обобщенная диаграмма работы стали

Несущую способность узлов фермы на продавливание при действии сжимающих продольных усилиях в раскосах оценим при наличии и отсутствии усиления. Примеры характерных изополей эквивалентных напряжений при наличии и отсутствии листовой накладки показаны на рис.3. Зависимости несущей способности узлов от углов примыкания раскосов в интервале $30^\circ\dots90^\circ$ показаны на графиках рис.4. Зависимости приведены в относительных параметрах $\bar{N} = N / N_u$, где $N_u = A_p R_y \gamma_c$ – максимальная несущая способность раскоса. Пунктирной линией показаны зависимости

несущей способности, вычисленные по формулам СП 294, EN 1993-1-8 и методикам [14, 15]:

$$N_i = \gamma_c \gamma_d \gamma_D R_y t_n^2 (b + 2\sqrt{Df}) / f \sin \alpha; \quad (1)$$

$$N_{i,Rd} = \frac{k_n f_y t_0^2}{1 - \beta \sin \theta_1} \left(\frac{2\eta}{\sin \theta_1} + 4\sqrt{1 - \beta} \right) / \gamma_{M5}. \quad (2)$$

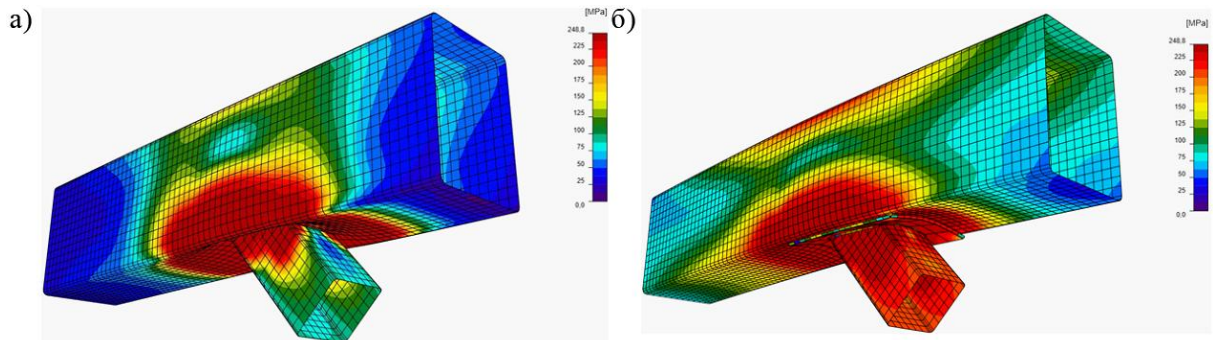


Рис. 3. – Изополя эквивалентных напряжений узла фермы из ГСП: а) без усиления; б) с усиливающей накладкой

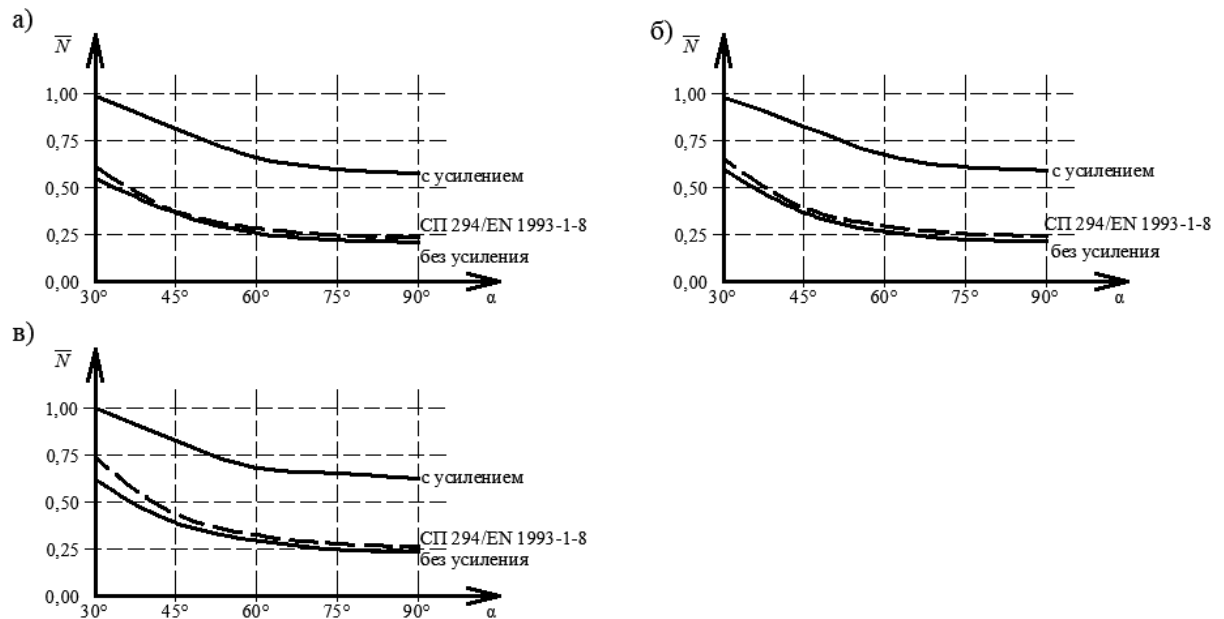


Рис. 4. – Несущая способность узлов при наличии и отсутствии усиливающей накладки: а) с раскосом 80x3; б) с раскосом 90x3; в) с раскосом 100x3

Заметно влияние усиливающей накладки на увеличение несущей способности узлов на продавливание, при угле примыкания раскосов 30° оно

составило 58,2%, при 90° – 163,9%. Сравнение результатов расчетов несущей способности узлов без усиления, полученных КМКЭ и вычисленных по методикам СП294/EN 1993-1-8, показало хорошую сходимость, расхождение не превысило 10%.

В действующих зарубежных нормах EN 1993-1-8 имеется методика расчета узлов с усилением, в которой толщина полки пояса в месте примыкания раскоса заменяется на толщину усиливающей накладки, при этом принимается, что в формуле (2) $k_n=1,0$. В отечественной литературе имеются справочные рекомендации, в которых при расчете на продавливание вместо толщины полки пояса $t_{п}$ в формуле (1) подставляется суммарная толщина с накладкой ($t_{п} + t_{н}$). Зависимости несущей способности узлов, вычисленные по упомянутым методикам и полученные КМКЭ, показаны на рис.5.

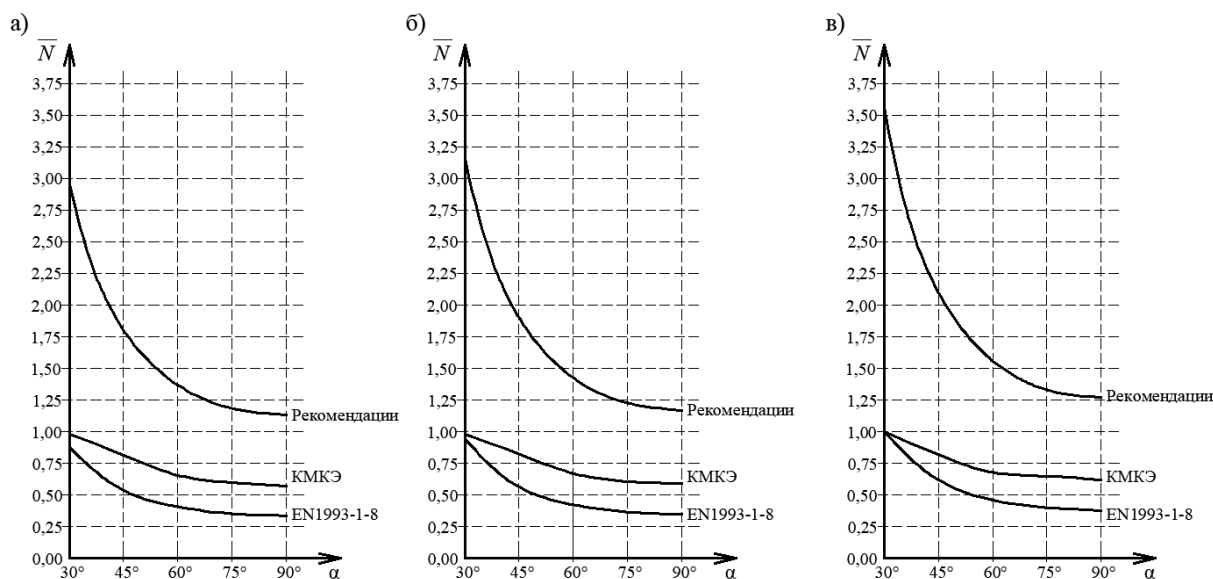


Рис. 5. – Несущая способность узлов при наличии и отсутствии усиливающей накладки: а) с раскосом 80×3 ; б) с раскосом 90×3 ; в) с раскосом 100×3

Более показательное изменение несущей способности узлов на продавливание представлено в таблицах 1-3.

Таблица № 1

Несущая способность узлов ферм из ГСП (сечение раскоса 80x3)

Несущая способность раскоса N_u , кН	Угол наклона	Несущая способность без усиления, \bar{N}		Несущая способность с усилением, \bar{N}		
		СП 294	IDEA StatiCa	Рекомендации	EN 1993-1-8	IDEA StatiCa
225,25	30°	0,610	0,549	2,951	0,878	0,982
	45°	0,372	0,362	1,802	0,536	0,813
	60°	0,283	0,257	1,368	0,407	0,657
	75°	0,245	0,219	1,184	0,352	0,597
	90°	0,234	0,209	1,132	0,337	0,573

Таблица № 2

Несущая способность узлов ферм из ГСП (сечение раскоса 90x3)

Несущая способность раскоса N_u , кН	Угол наклона	Несущая способность без усиления, \bar{N}		Несущая способность с усилением, \bar{N}		
		СП 294	IDEA StatiCa	Рекомендации	EN 1993-1-8	IDEA StatiCa
255,25	30°	0,653	0,594	3,161	0,941	0,979
	45°	0,392	0,366	1,900	0,564	0,823
	60°	0,295	0,263	1,425	0,424	0,671
	75°	0,254	0,224	1,227	0,365	0,608
	90°	0,242	0,213	1,171	0,348	0,592

Таблица № 3

Несущая способность узлов ферм из ГСП (сечение раскоса 100x3)

Несущая способность раскоса N_u , кН	Угол наклона	Несущая способность без усиления, \bar{N}		Несущая способность с усилением, \bar{N}		
		СП 294	IDEA StatiCa	Рекомендации	EN 1993-1-8	IDEA StatiCa
285,25	30°	0,735	0,619	3,560	1,059	1,063
	45°	0,433	0,386	2,095	0,623	0,819
	60°	0,322	0,293	1,558	0,464	0,684
	75°	0,276	0,246	1,334	0,397	0,648
	90°	0,263	0,234	1,271	0,378	0,617

В таблицах 1-3 относительные продольные усилия $\bar{N} = N / N_u$ определены в зависимости от ширины раскоса и его угла примыкания к поясам.

Сравнение результатов расчетов КМКЭ показало хорошую сходимость с методикой расчета EN 1993-1-8 при минимальном угле примыкания раскоса 30° (расхождение не более 11%). При значительных углах примыкания раскосов выявлена недооценка несущей способности узлов до 41,2%. Результаты расчетов усиленных узлов по справочной методике показывают существенную переоценку несущей способности узла с усилением на продавливание, при угле примыкания раскоса 30° она составила до 235,0%, при 90° – 105,9%.

С целью верификации результатов, полученных компонентным методом конечных элементов, был проведен расчет наиболее нагруженного узла (раскос 80×3 , угол примыкания 90°) с учетом физической нелинейности стали и материала шва в программном комплексе ANSYS. Контактная пара листовой накладки и пояса моделировалась конечными элементами типа TARGE174 и CONTAC174, тип контакта – Frictionless. Деформированная схема узла при продавливании показана на рис.6.

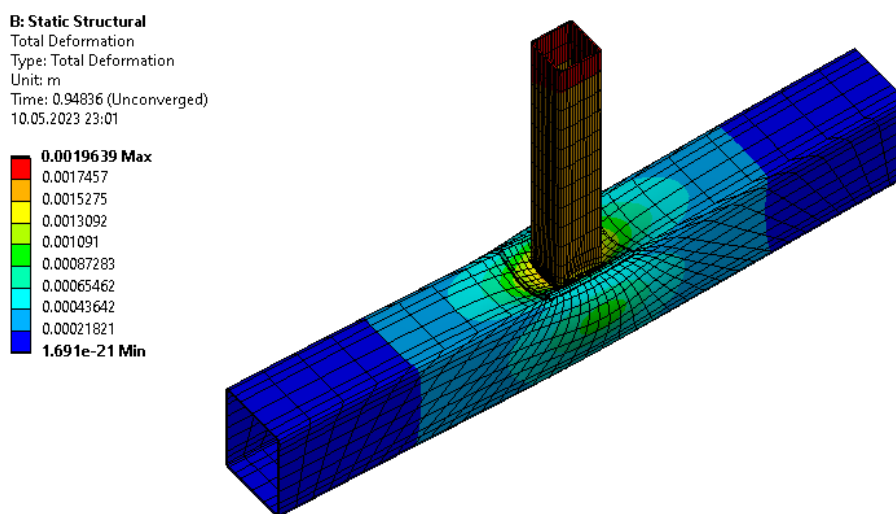


Рис. 6. Деформированная схема узла в ANSYS

Несущая способность узла на продавливание, определенная в ANSYS, составила $\bar{N} = 0,586$ (с использованием КМКЭ $\bar{N} = 0,573$), что подтвердило корректность проведенных расчетов.

Обсуждение

Из результатов расчетов, представленных в таблицах 1-3 можно сделать вывод, что листовые накладки весьма существенно влияют на увеличение несущей способности узлов ферм из ГСП по критерию прочности на продавливание. При наименее выгодном угле примыкания раскоса ($\alpha = 90^\circ$) увеличение несущей способности узлов – минимально, что соответствует наихудшему характеру загрузки узла. Анализируя результаты сравнения, можно отметить, что несущая способность усиленных узлов весьма существенно зависит от угла примыкания раскоса, при этом в меньшей степени зависит от его ширины.

Методика расчета EN 1993-1-8 показывает значительные запасы несущей способности при углах примыкания близким к 90° (до 41,2%). Указанные рекомендации можно использовать при приближенной оценке прочности усиленных узлов на продавливание (в запас).

В практическом применении для оценки прочности усиленного узла на продавливание предлагается использовать формулу (87) СП 294 с заменой толщины пояса $t_{\text{п}}$ на приведенную $t_{\text{прив}}$, учитывающую влияние листовой накладки и угол примыкания раскоса:

$$\frac{(N + 1,7M / d_b) f \sin \alpha}{\gamma_c \gamma_d \gamma_D R_y t_{\text{прив}}^2 (b + 2\sqrt{Df})} \leq 1, \quad (3)$$

где $t_{\text{прив}} = t_{\text{п}} \frac{I_{x,\text{п}}^{\text{усил}}}{I_{x,\text{п}}} \sqrt{0,25 + \sin \alpha}$, $I_{x,\text{п}}$ – момент инерции пояса; $I_{x,\text{п}}^{\text{усил}}$ – момент

инерции усиленного сечения.

Сравнение несущей способности узла на продавливание, определенной с помощью КМКЭ и вычисленной по формуле (3), показало хорошую сходимость, расхождение в среднем составило 3%. Следует заметить, что предлагаемая методика подлежит уточнению при получении данных о влиянии толщины накладки на увеличение прочности узла.

Выводы

1. Усиление узлов ферм из ГСП листовой накладкой приводит к весьма существенному повышению его несущей способности по критерию прочности на продавливание: при угле примыкания раскосов 30° на 58,2%, при 90° – 163,9%.

2. Из анализа отечественной нормативной литературы расчета узлов ферм из ГСП на продавливание следует, что на сегодняшний день отсутствует алгоритм подобного расчета с усилением. Предлагаемая методика позволит оценить увеличение несущей способности узла.

В дальнейших исследованиях планируется провести анализ влияния толщины усиливающей накладки в зависимости от параметров пояса на увеличение несущей способности узлов ферм из ГСП. При этом, результаты, изложенные в статье, можно использовать при разработке соответствующих нормативных методик.

Литература

1. Левитанский И.В., Севрюгин В.В., Джафарова Э.Р. Область применения гнутосварных замкнутых профилей в металлических конструкциях промышленных зданий // Проектирование металлических конструкций. 1974. № 7. С. 42-56.

2. Симченко О.Л., Калаев В.П., Новиков М.Ю. Сравнительный анализ технико-экономических показателей легких стропильных ферм с параллельными поясами пролетом 24 м из парных уголков и ферм из

гнуто сварных профилей типа «Молодечно» с использованием программного комплекса SCAD OFFICE // Выставка инноваций - 2021 (весенняя сессия). Сборник материалов XXXI Республиканской выставки-сессии студенческих инновационных проектов и XL Научно-технической конференции молодежи АО «ИЭМЗ «Купол». Ижевск, 2021. С. 151-156.

3. Grundy P., Foo E.K.J. Performance of flattened tube connections // Proceedings 4th International Symposium on Tubular Structures, Delft, The Netherlands, Delft University Press, Delft, The Netherlands. 1991. С. 251-258.

4. Соколов А.А., Логачев К.И., Зинькова В.А. Численные исследования напряженно-деформированного состояния узловых бесфасоночных соединений трубчатых элементов ферм // Промышленное и гражданское строительство. 2007. № 8. С. 40-41.

5. Цетлин Б.С., Гукова М.И., Иммерман А.Г., Тесля-Тесленко Г.В. Расчет и проектирование узлов стальных ферм из прямоугольных гнуто сварных профилей // Промышленное строительство. 1979. № 12. С. 17-18.

6. Цетлин Б.С., Гукова М.И., Тесля-Тесленко Г.В., Апарина Н.И. О несущей способности поясных элементов в сопряжениях прямоугольных труб // Строительная механика и расчет сооружений. 1979. №1. С. 56-58.

7. Korol R.M., Mansour M.H. Theoretical analysis of haunch-reinforced T-joints in square hollow sections // Canadian Journal of Civil Engineering. 1979. Т.6. № 4. pp. 601-609.

8. Korol R.M., Mirza F.A. Finite element analysis of RHS T-joints // Journal of the Structural Division, American Society of Civil Engineers. 1982. Т.108 (9). pp. 2081-2098.

9. de Matos R.M.M.P., Costa-Neves L.F., de Lima L.R.O., Vellasco P.C.G.S., da Silva J.G.S. Resistance and elastic stiffness of RHS "T" joints: part I - axial brace loading // Latin American Journal of Solids and Structures. 2015. Т.12 (11). pp. 2159-2179.

10. Зинькова В.А. Методика экспериментальных исследований узловых соединений трубчатых элементов фермы // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2012. № 1. С. 50-51.

11. Bauer, D., Redwood, R.G. Triangular truss joints using rectangular tubes // Journal of Structural Engineering, American Society of Civil Engineers. 1988. T.114(2). С. 408-424.

12. Устименко Е.Е., Скачков С.В. Метод конечных элементов модели тонкостенного профиля с полками объемного фасонного элемента // Инженерный вестник Дона, 2019, №4 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2019/5768.

13. Абзалов А.Р., Волкова И.И. Технологические методы обеспечения усталостной прочности упругих элементов // Инженерный вестник Дона, 2014, №2 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2351.

14. Packer J.A., Wardenier J., Zhao X.-L., van der Vegte G.J., Kurobane Y. Design guide for rectangular hollow section (RHS) joints under predominantly static loading. CIDECT, 2009. 156 p.

15. Packer Jeffrey A., Henderson J. E. (Ted) Hollow Structural Section Connections and Trusses - a Design Guide. Canadian Institute of Steel Construction, 1997. 235 p.

References

1. Levitanskij I.V., Sevrjugin V.V., Dzhafarova Je.R. Proektirovanie metallicheskih konstrukcij. 1974. № 7. pp. 42-56.

2. Simchenko O.L., Kalaev V.P., Novikov M.Ju. Sravnitel'nyj analiz tehniko-jekonomicheskikh pokazatelej legkih stropil'nyh ferm s parallel'nymi pojasami proletom 24 m iz parnyh ugolkov i ferm iz gnutosvarnyh profilej tipa «Molodechno» s ispol'zovaniem programmnoho kompleksa SCAD OFFICE [Comparative analysis of technical and economic indicators of light trusses with parallel belts with a span of 24 m from paired corners and trusses from bent-

welded profiles of the Molodechno type using the SCAD OFFICE software package]. Vystavka innovacij - 2021 (vesennjaja sessija). Sbornik materialov XXXI Respublikanskoj vystavki-sessii studencheskih innovacionnyh proektov i XL Nauchno-tehnicheskoy konferencii molodezhi AO «IJeMZ «Kupol». Izhevsk, 2021. pp. 151-156.

3. Grundy P., Foo E.K.J. Performance of flattened tube connections. Proceedings 4th International Symposium on Tubular Structures, Delft, The Netherlands, Delft University Press, Delft, The Netherlands. 1991. pp. 251-258.

4. Sokolov A.A., Logachev K.I., Zin'kova V.A. Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. 2007. № 8. pp. 40-41.

5. Cetlin B.S., Gukova M.I., Immerman A.G., Teslja-Teslenko G.V. Promyshlennoe stroitel'stvo. 1979. № 12. pp. 17-18.

6. Cetlin B.S., Gukova M.I., Teslja-Teslenko G.V., Aparina N.I. Stroitel'naja mehanika i raschet sooruzhenij. 1979. №1. pp. 56-58.

7. Korol R.M., Mansour M.H. Canadian Journal of Civil Engineering. 1979. V.6. № 4. pp. 601-609.

8. Korol R.M., Mirza F.A. Journal of the Structural Division, American Society of Civil Engineers. 1982. V.108 (9). pp. 2081-2098.

9. de Matos R.M.M.P., Costa-Neves L.F., de Lima L.R.O., Vellasco P.C.G.S., da Silva J.G.S. Latin American Journal of Solids and Structures. 2015. V.12(11). pp. 2159-2179.

10. Zin'kova V.A. Vestnik BGTU im. V.G. Shuhova. 2012. № 1. pp. 50-51.

11. Bauer, D., Redwood, R.G. Journal of Structural Engineering, American Society of Civil Engineers. 1988. V.114(2). pp. 408-424.

12. Ustimenko E.E., Skachkov S.V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2019, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2019/5768.

13. Abzalov A.R., Volkova I.I. Inzhenernyj vestnik Dona, 2014, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2351.



14. Packer J.A., Wardenier J., Zhao X.-L., van der Vegte G.J., Kurobane Y. Design guide for rectangular hollow section (RHS) joints under predominantly static loading. CIDECT, 2009. 156 p.

15. Packer Jeffrey A., Henderson J. E. (Ted) Hollow Structural Section Connections and Trusses - a Design Guide. Canadian Institute of Steel Construction, 1997. 235 p.