

УДК 624.078.4:004.94

DOI 10.52928/2070-1683-2023-33-1-39-44

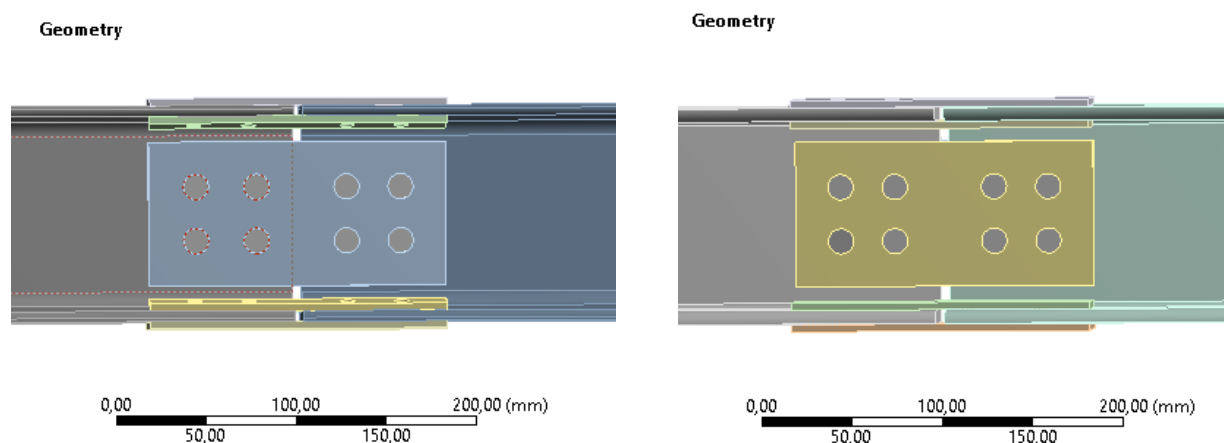
**АНАЛИЗ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК УЗЛОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ
СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ В СРЕДЕ ANSYS***канд. физ.-мат. наук Т.М. МАРТЫНЕНКО,**канд. техн. наук, доц. О.О. СМИЛОВЕНКО,**В.А. МАКСИМОВИЧ, М.В. МЕЛЮХ**(Университет гражданской защиты МЧС Беларуси, Минск)*

В статье исследована прочность наиболее распространенных в практике строительства сварного и болтового соединений, нагруженных сосредоточенной силой, приложенной вдоль оси соединительной накладки. Рассмотрено влияние конструктивного исполнения узловых соединений на напряженно-деформированное состояние пространственной конструкции из стержней открытого профиля и возникающих крутящих воздействий в зависимости от вида закрепления элементов. Расчет конструкции сводится к определению напряжений и перемещений в узлах закрепления, по которым затем определяют изменение механических характеристик стали.

Ключевые слова: стержень открытого профиля, узлы сопряжения соединяемых элементов, местное увеличение жесткости, болтовое соединение, сварное соединение, деформирование накладок в соединении.

Введение. Здания и сооружения, каркас которых выполнен из стержней открытого профиля, широко применяются как торгово-развлекательные центры, промышленные, складские и прочие объекты. Применение таких конструкций из открытого профиля, называемых фермами, обусловлено быстрыми темпами возведения в сочетании с высокой технологичностью, эксплуатационной надежностью и долговечностью, минимальным количеством узлов сопряжения. Обладая указанными преимуществами, фермы в то же время не застрахованы от аварий, которые вызваны разрушением узлов [1; 2]. Это объясняется тем, что несущая способность ферм в большей мере определяется прочностью узловых соединений, которые воспринимают поперечные усилия, равномерно распределяют их по стержням пояса, за счет чего увеличивают жесткость всей конструкции. Местное увеличение жесткости узла влияет на изгиб стержневой конструкции фермы, формирует сложную картину полей остаточных напряжений, зон с повышенной структурно-механической неоднородностью. Как установлено [3; 4], разрушение узлов связано со снижением пластических свойств стали при наличии значительных концентраций напряжений, возникающих вследствие передачи усилий от сжатого элемента к растянутому, и через пояс фермы на сварные швы и болтовые соединения. Целью исследования является повышение надежности каркасных конструкций на основе результатов компьютерного моделирования напряженного состояния узловых соединений ферм. Разработаны объемные модели узлов, выполненных из двутаврового и таврового профилей, для соединения которых использовались либо болтовые соединения, либо сварные швы. Для оценки влияния узлов на работоспособность конструкции выполнен численный эксперимент.

Экспериментальные исследования. Исследована конструкция узла в виде прямого стыкового соединения с накладкой. Для создания трехмерной модели конструкции использован программный комплекс Autodesk Inventor Professional, который позволяет работать со сборкой из твердых тел, находящихся в параметрических зависимостях между собой, что дает возможность варьировать геометрические параметры конструкции при проведении модельных экспериментов (рисунок 1). Далее был произведен экспорт в ANSYS [5; 6].



а – модель болтового соединения двутаврового и таврового соединений балки

Рисунок 1. – Вид объемной модели (начало)

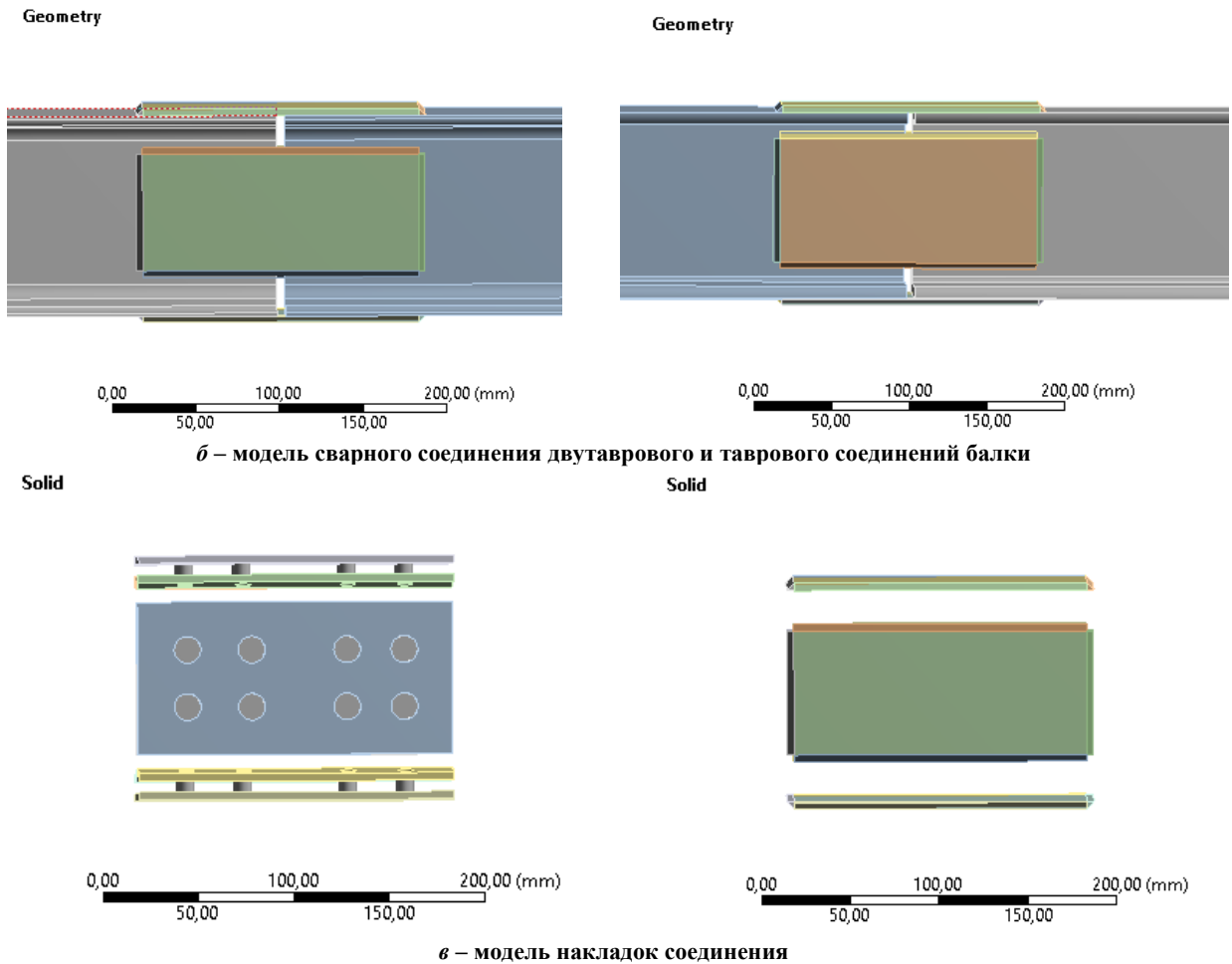


Рисунок 1. – Вид объемной модели (окончание)

Переходим от тел к конечным элементам, для чего нужно выбрать характерный размер элемента, форму элемента, способы разбиения. Для моделирования объемных сплошных тел ANSYS Workbench по умолчанию использует 3D элементы типа SOLID186 и SOLID187. Конечный элемент SOLID186 – трехмерный элемент объемного напряженно-деформированного состояния (НДС) с двадцатью узлами, при этом каждый узел обладает шестью степенями свободы – три перемещения вдоль осей и три поворота вокруг осей узловой системы координат. Конечный элемент SOLID187 – трехмерный элемент объемного напряженно-деформированного состояния с десятью узлами в форме тетраэдра, при этом каждый узел обладает тремя степенями свободы – три перемещения вдоль осей узловой системы координат. Элементы SOLID186 и SOLID187 возможно использовать как в задачах с линейной постановкой, так и в задачах с нелинейной постановкой с большими деформациями [7]. Конечные элементы имеют произвольную ориентацию в пространстве и обладают свойствами пластичности, ползучести, гиперупругости, изменения жесткости под действием нагрузок.

Исследуемая конечно-элементная модель включала 53 676 конечных элементов двух основных типов: SOLID186 (трехмерный НДС призматической формы с двадцатью узлами) и SOLID187 (трехмерный элемент объемного НДС с десятью узлами в форме тетраэдра), средний «габаритный» размер соединения составлял 1 мм, открытый профиль 5 мм (рисунок 2) [8].

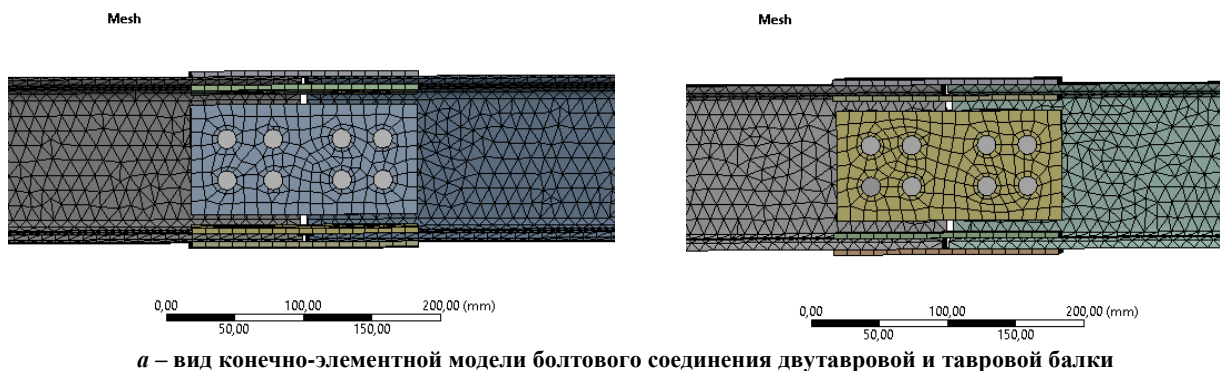


Рисунок 2. – Объемный вид конечно-элементной модели (начало)

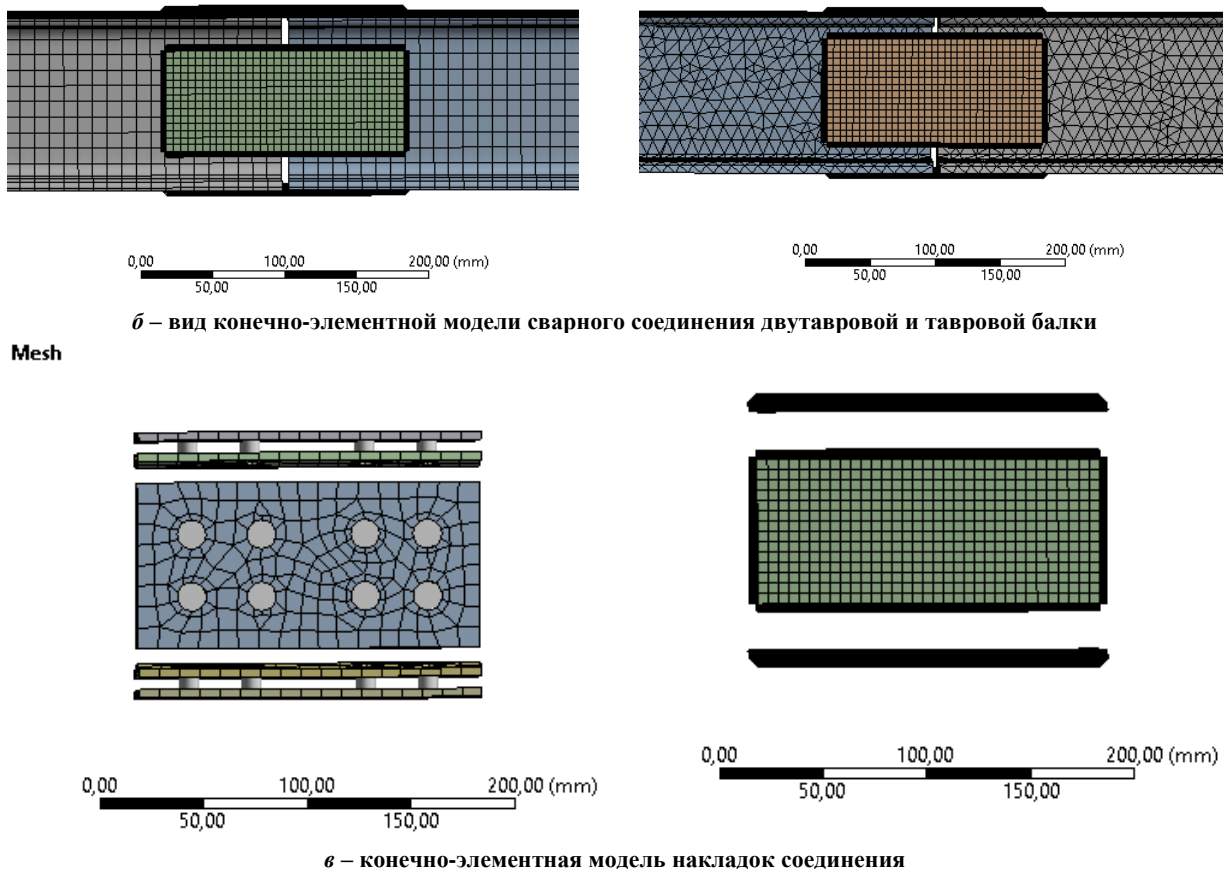


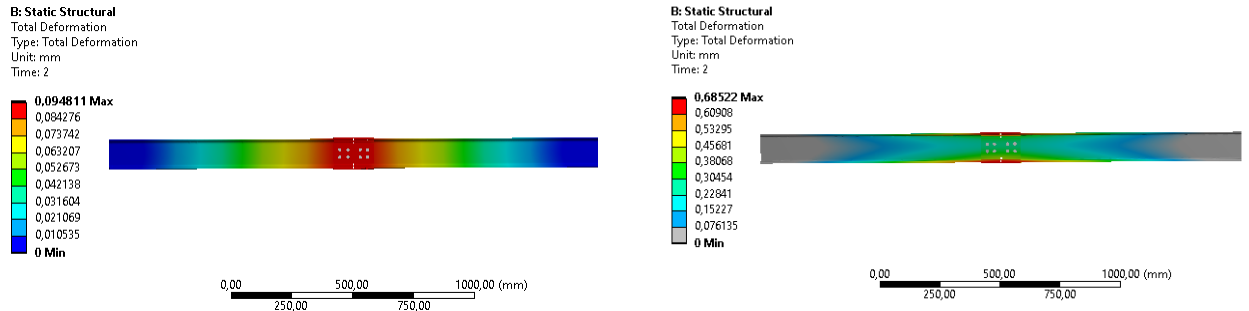
Рисунок 2. – Объемный вид конечно-элементной модели (окончание)

Предусмотрен следующий вид нагружения исследуемого объекта: концы балки жестко закреплены, приложена нагрузка вдоль соединительной накладки. Задание граничных и начальных условий, выбор физической модели расчета – препроцессинг программы. Края конструкции жестко заделаны для болтового таврового и двутаврового соединений в точках (АВ, АС, R, S), для сварных соединений в точках (В, С). Точка (А) – место приложения нагрузки в 1 кН (рисунок 3).

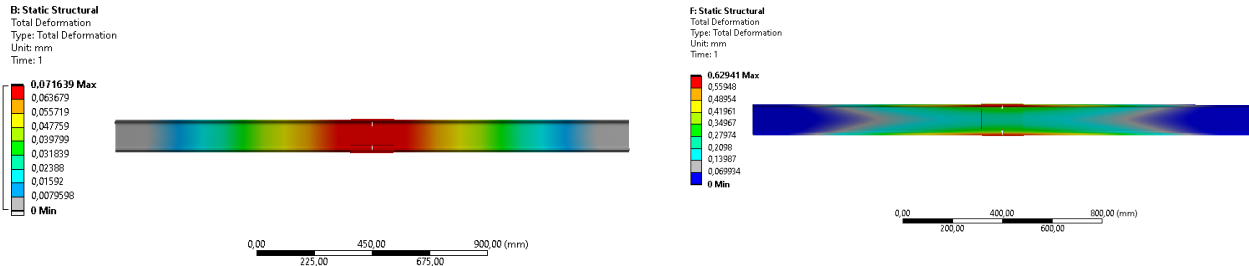


Рисунок 3. – Физическая модель расчета

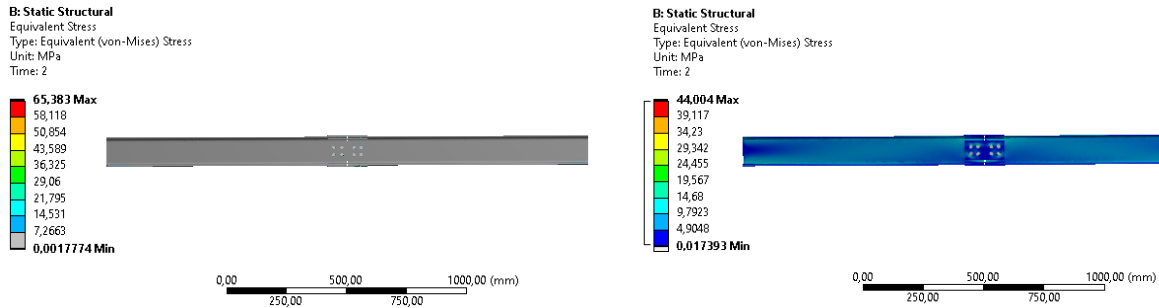
Для данной конечно-элементной модели проводим статический расчет конструкции, оцениваем распределение как нормальных, так и эквивалентных напряжений, выделяем значения относительных удлинений и полных перемещений (рисунок 4).



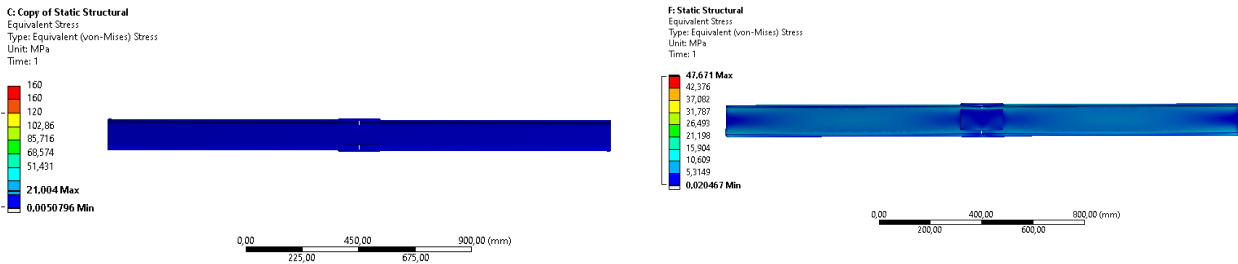
а – схема деформирования болтового двутаврового и таврового соединений



б – схема деформирования сварного двутаврового и таврового соединений



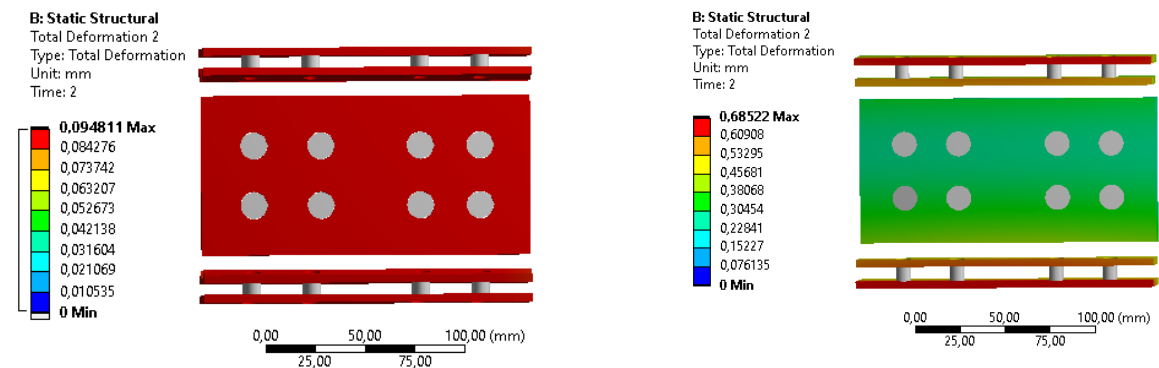
в – схема напряжения болтового двутаврового и таврового соединений



г – схема напряжения сварного двутаврового и таврового соединений

Рисунок 4. – Результаты статического расчета двутаврового и таврового соединений

Затем проводим статический расчет накладки, оцениваем относительное удлинение и полное перемещение в областях образования деформации (рисунок 5).



а – схема деформирования болтовой накладки двутаврового и таврового соединений

Рисунок 5. – Результаты статического расчета накладок таврового и двутаврового соединений (начало)

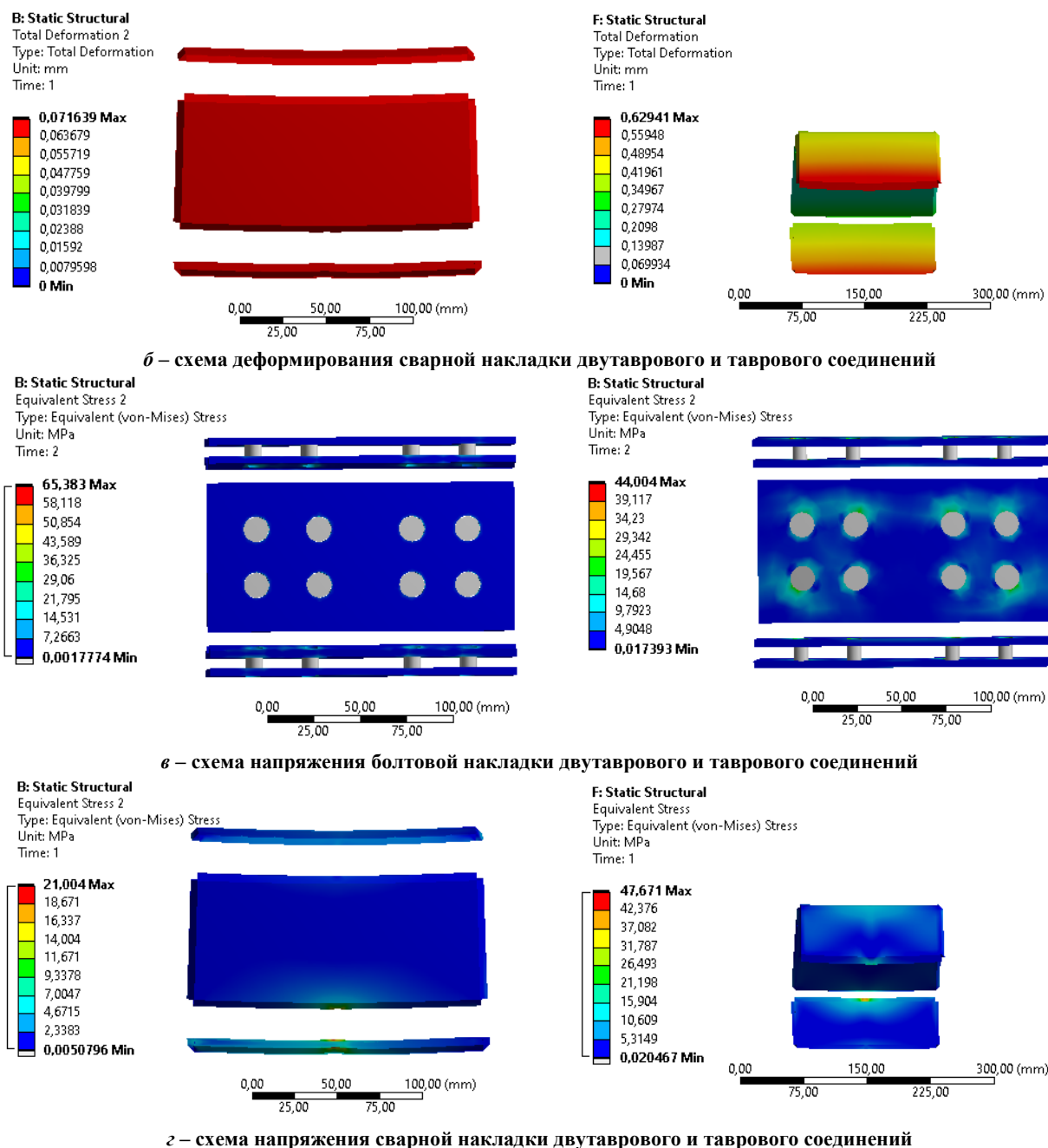


Рисунок 5. – Результаты статического расчета накладок таврового и двутаврового соединений (окончание)

Испытания в среде ANSYS проведены для сварного и болтового узлов соединения тавровой и двутавровой балки. Показан характер передачи усилий в рассмотренных узлах, учтены конструктивные особенности сварных и болтовых узлов. Результаты статического расчета показали: максимальное линейное перемещение наблюдается в тавровом болтовом соединении, двутавровое болтовое соединение лучше воспринимает нагрузку ввиду ее равномерного распределения по накладке. Сварное соединение тавровой балки хуже воспринимает изгибающий момент, в результате чего могут возникнуть хрупкие трещины, ведущие к уменьшению жесткости соединения.

Заключение. Исследовано состояние узлов фермы из стержней открытого профиля с различными типами узловых соединений, нагруженных сосредоточенной силой, приложенной вдоль соединительной накладки.

Определены напряжения и перемещения в узлах соединения, показаны области изменения механических характеристик стали, влияющие на прочность и жесткость рассматриваемой конструкции. Получена картина напряженно-деформированного состояния болтового и сварного соединений узла. Выявлены наиболее вероятные зоны изменения пластических свойств стали, однако зон напряжений, близких к критическим, не обнаружено, при этом за критическое напряжение принято характерное для строительных конструкций расчетное сопротивление $R_y = 235$ МПа для прокатного профиля.

Установлено, что высокая жесткость узловых соединений приводит к уменьшению продольных усилий в стержнях, но в то же время вызывает дополнительные напряжения от изгибающих моментов, причем сварной узел обладает большей жесткостью, в отличие от болтового (см. рисунок 4, б). Удлинение в двутавровом узле с болтовым соединением составляет 0,09 мм, а в аналогичном сварном – 0,07 мм. Разница в 20% объясняется большей стыковой податливостью болтового соединения по сравнению со сварным.

Полученные результаты являются первичными и определяют направление дальнейших исследований напряженного состояния узловых конструкций ферм при различных видах нагрузки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вольмир А.С. Устойчивость деформируемых систем. – М.: Наука, 1967. – 984 с.
2. Дарков А.В., Шапошников Н.Н. Строительная механика. – М.: Высш. Шк., 1986. – 607 с.
3. Перельмутер А.В., Сливкер В.И. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа. – М.: ДМК Пресс, 2002. – 618 с.
4. Лещенко А.П. Фундаментальная строительная механика упругих систем. – М.: ЛКИ, 2008. – 976 с.
5. Дьяков И.Ф., Чернов С.А. К расчету оболочки, укрепленной тонкостенными стержнями // Автоматизация и современные технологии. – 2008. – № 1. – С. 16–20.
6. Басов К.А. ANSYS в примерах и задачах / Под ред. Д.Г. Красковского. – М.: Компьютер-Пресс, 2002. – 223 с.
7. Конструирование зданий и сооружений. Легкие стальные тонкостенные конструкции: учеб. пособие / Н.И. Ватин, Е.Н. Жмарин, В.Г. Куражова и др. – СПб.: Политехн. ун-т, 2012. – 266 с.
8. Икрин В.А. Сопrotivление материалов с элементами теории упругости и пластичности: учеб. – М: АСВ, 2004. – 424 с.

REFERENCES

1. Vol'mir, A.S. (1967). *Ustoichivost' deformiruemykh sistem*. Moscow: Nauka. (In Russ.).
2. Darkov, A.V. & Shaposhnikov, N.N. (1986) *Stroitel'naya mekhanika*. Moscow: Vyssh. shk. (In Russ.).
3. Perel'muter, A.V. & Slivker, V.I (2002). *Raschetnye modeli sooruzhenii i vozmozhnost' ikh analiza*. Moscow: DMK Press. (In Russ.).
4. Leshchenko, A.P. (2008). *Fundamental'naya stroitel'naya mekhanika uprugikh sistem*. Moscow: LKI. (In Russ.).
5. D'yakov, I.F. & Chernov, S.A. (2008). K raschetu obolochki, ukreplennoi tonkostennymi sterzhnyami. *Avtomatizatsiya i sovremennye tekhnologii*, (1), 16–20. URL: <https://library.bmstu.ru/Catalog/Details/184565>. (In Russ.).
6. Basov, K.A. & Krasovskii, D.G. (Eds.) (2002). *ANSYS v primerakh i zadachakh*. Moscow: ComputersPress. (In Russ.).
7. Vatin, N.I., Zhmarin, E.N., Kurazhova, V.G., Usanova, K.Yu. (2012). *Konstruirovaniye zdaniy i sooruzhenii. Legkie stal'nye tonkostennyye konstruksii: ucheb. posobie*. St. Petersburg: Polytechn. un-t. (In Russ.).
8. Ikrin, V.A. (2004). *Soprotivlenie materialov s elementami teorii uprugosti i plastichnosti: ucheb*. Moscow: ASV. (In Russ.).

Поступила 06.02.2023

ANALYSIS OF MECHANICAL CHARACTERISTICS OF KNOT CONNECTIONS IN BUILDING STRUCTURES BASED ON ANSYS SIMULATION

T. MARTYNENKO, O. SMILOVENKO, V. MAXIMOVICH, M. MELUKH

(The University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus, Minsk)

The most common cross-section – the joining of two symmetrical I-beams – is investigated in this work. The transmission of force on the node connection in the form of a multi-bolt connection, welded connection, welded connection through the lining is modeled. The effect of node connections on the stress-strain state of the spatial structure made of thin-walled open section rods, torsional effects depending on the fastening of the elements is studied. The calculation of the structure is reduced to the determination of the stresses and displacements in the fastening nodes, by which the change in the mechanical characteristics of steel is then determined.

Keywords: *open profile rod, joints of joined elements, local stiffening, bolted joint, welded joint, deformation of overlays in the joint.*