

ОЦЕНКА УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ ТИПОВЫХ СВАРНЫХ УЗЛОВ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ В СРЕДЕ ANSYS

¹Мартыненко Т. М., ²Пронкевич С. А., ²Мартыненко И. М., ³Скляр О. Н.

¹Университет гражданской защиты МЧС Беларуси, Минск;

²Белорусский государственный университет, Минск

³Белорусский национальный технический университет, Минск

Введение. При строительстве различных зданий и сооружений широко применяются стержни открытого профиля, которые воспринимают нагрузки от выше расположенных элементов и передают их на фундамент. Усилия, возникающие при этом в стержнях, зависят от конструкции соединения примыкающих элементов. Одним из вариантов соединения является сварное соединение. С точки зрения эксплуатации зданий сварные узлы представляют особый интерес, так как они наиболее часто подвергаются разрушению, что влечет за собой потерю прочности и выход из строя всей конструкции. Сложность получения сварных узлов приводит к появлению концентраторов напряжений, а сварные швы могут иметь различные дефекты, приводящие к разрушению.

Разрушение сварных швов происходит в три этапа. В начале в месте соединения появляются микротрещины. Затем происходит их рост, с увеличением скорости под действием циклических внешних нагрузок. В дальнейшем конструкция начинает спонтанно разрушаться, так как ослабленное поперечное сечение не обладает достаточным моментом сопротивления для противодействия внешним нагрузкам [1; 2]. Исследования сварных швов на микро уровне показали, что микротрещины появляются уже после выработки 1 % ресурса работы соединения. К тому же, небольшие поверхностные дефекты, выступающие в роли источников зарождения трещин, уже могут присутствовать при поставке изделия производителем и монтаже сварных узлов. Усталость напрямую зависит от геометрических аспектов конструкции, таких как размеры и расположение трещин в узлах конструкции. Основной причиной появления концентраторов напряжений является наличие резкого изменения размеров элементов конструкции.

Таким образом, на усталостную долговечность сварного соединения влияют множество различных факторов, таких как геометрия узла, направление и вид внешней нагрузки, диапазон распределения напряжений [3; 4], появления остаточных напряжений и деформаций, наличие дефектов сварных швов. Оценка усталостного ресурса сварных швов является сложной задачей, зависящей от вида внешней нагрузки, геометрических параметров сварного шва и др. Так же оценка усталостного ресурса на концах сварных швов ограничена, и зачастую это самое слабое место сварного шва. Циклические воздействия нагрузок приводит к изменению усталостной долговечности сварной конструкции.

Экспериментальные исследования. Проведено исследование конструкции 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 размеры конструкции при проведении расчетных экспериментов (рисунок 1). Далее был произведен экспорт геометрии сварного соединения в ANSYS [5; 6].

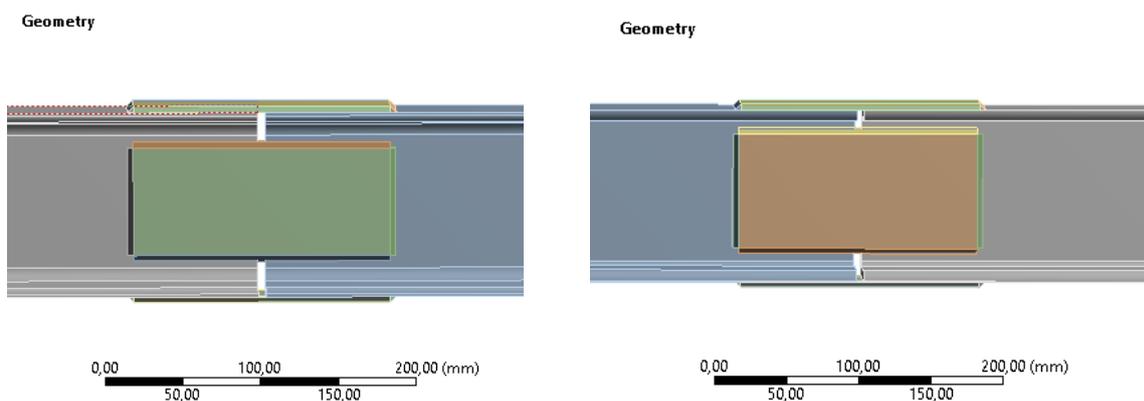


Рис. 1. Модель сварного соединения двутаврового и таврового соединений балок

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 SOLID 186 – 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 SOLID 187 – 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: SOLID 186 (трехмерный НДС призматической формы с двадцатью узлами) и SOLID 187 (трехмерный элемент объемного НДС с десятью узлами в форме тетраэдра), средний «габаритный» размер соединения составлял 1 мм, открытый профиль 5 мм (рисунок 2) [8].

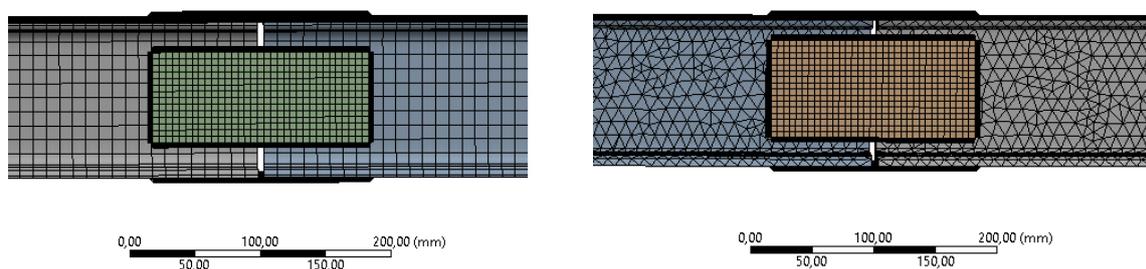


Рис. 2. Вид конечно-элементной модели сварного соединения двутавровой и тавровой балки

Предусмотрен следующий вид нагружения исследуемого объекта: концы балки жестко закреплены, приложена нагрузка вдоль соединительной накладке. Края конструкции жестко заделаны для болтового таврового и двутаврового соединений в точках (AB, AC), для сварных соединений в точках (B, C). Точка (A) – место приложения нагрузки в 10 кН (рисунок 3).

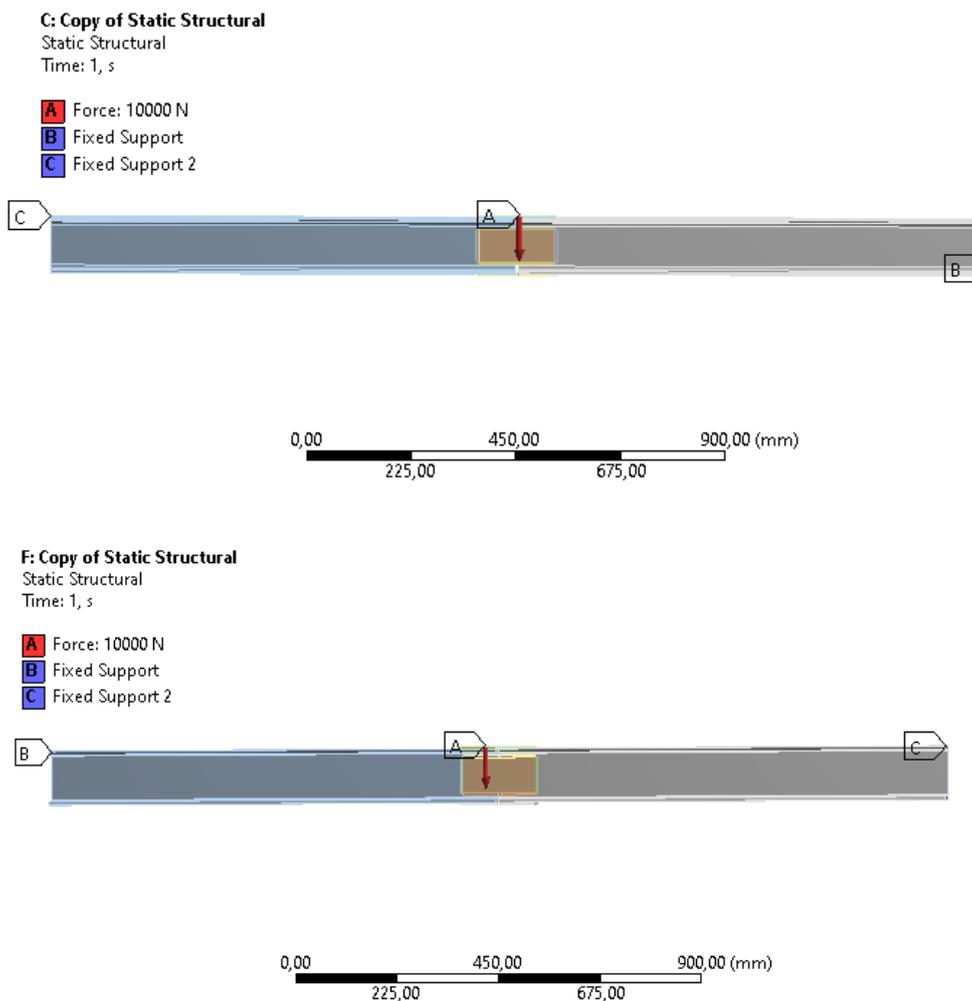
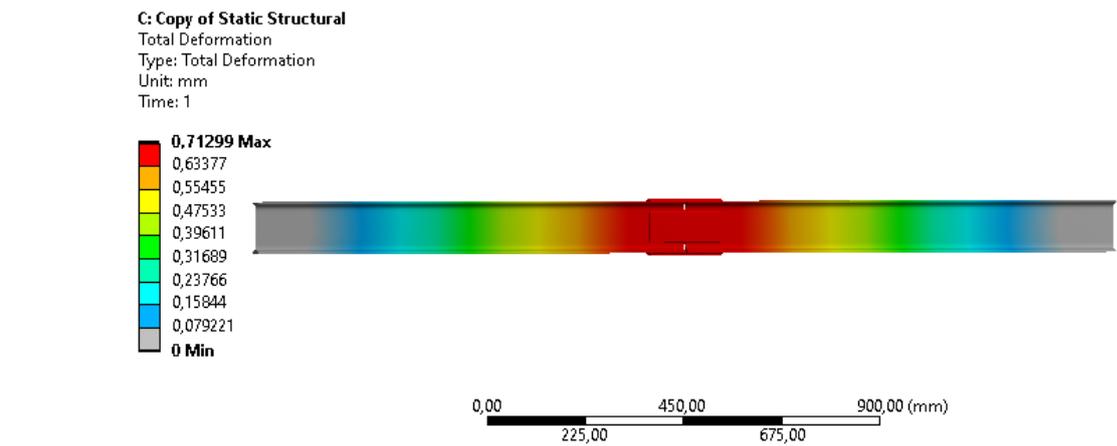
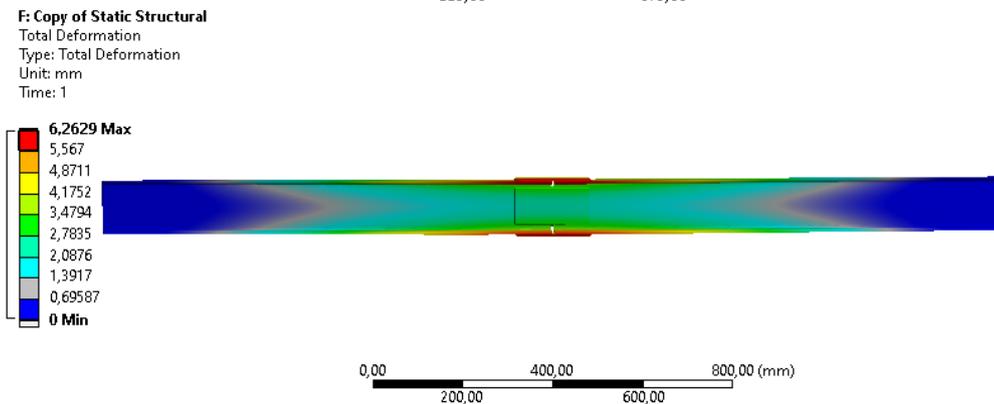
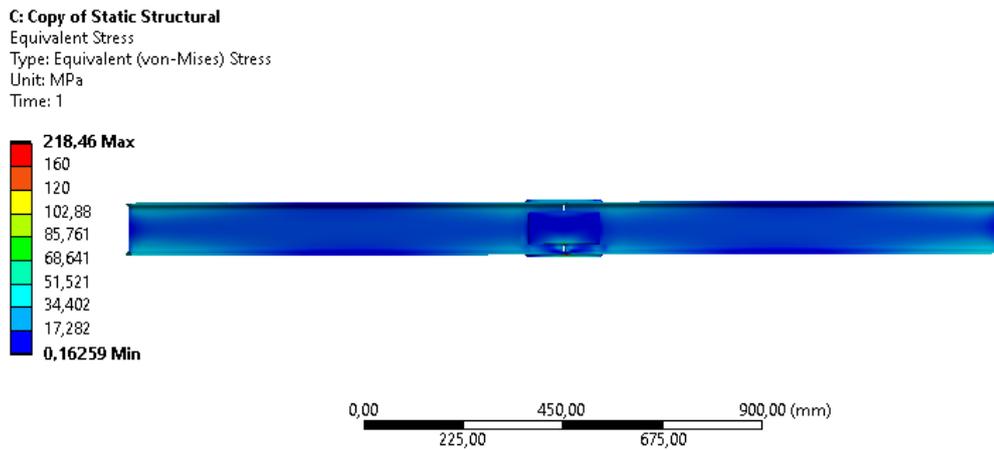


Рис. 3. Физическая модель расчета сварного двутаврового и таврового соединений, нагрузка приложена вдоль соединительной накладки

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).



a



б

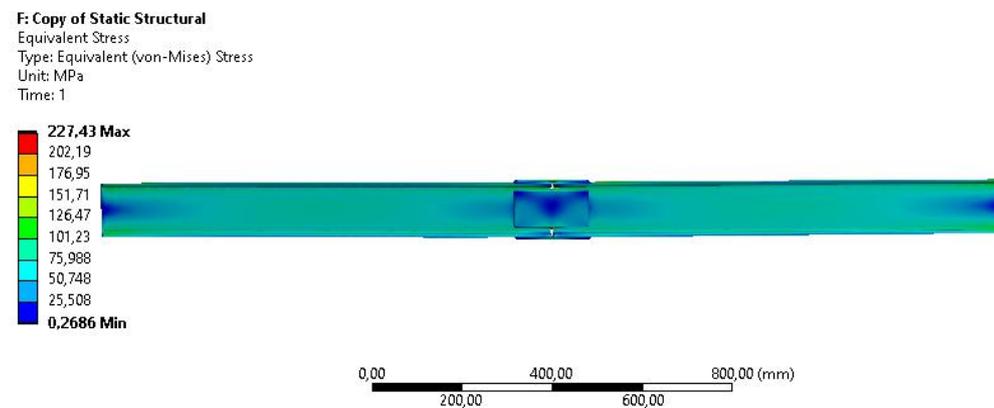


Рис. 4. Результаты статического расчета двутаврового и таврового соединений: *a* – схема деформирования сварного двутаврового соединения; *б* – схема напряжения сварного таврового соединения

Для расчета прочностных характеристик данных соединений при вертикально сжимающей нагрузке, долговечность характеризуется кривой S / N (от напряжения S к количеству циклов нагружения $N = 2 \cdot 10^6$ или кривой Веллера) [9] (рисунок 5).

Fatigue Life – Этот результирующий контурный график показывает доступный срок службы для данного анализа усталости. Если нагрузка имеет постоянную амплитуду, это представляет собой количество циклов до тех пор, пока звено не выйдет из строя из-за усталости. Если нагрузка непостоянна, это представляет количество блоков загрузки до отказа.

Fatigue Damage – Усталостное повреждение представляет собой контурный график усталостного повреждения при заданном расчетном сроке службы. Усталостное повреждение определяется как расчетный срок службы, деленный на имеющийся срок службы. Этот результат может быть ограничен. Расчетный срок службы по умолчанию можно установить с помощью панели управления. Для усталостного повреждения значения больше 1 указывают на отказ до достижения расчетного срока службы.

Fatigue safety factor – Коэффициент запаса прочности по усталости представляет собой контурную диаграмму коэффициента запаса прочности по отношению к усталостному разрушению при заданном расчетном сроке службы. Максимальный отображаемый коэффициент запаса прочности равен 15. Как и в случае повреждений и жизни, этот результат может быть ограничен. Для коэффициента запаса по усталости значения меньше единицы указывают на отказ до достижения расчетного срока службы.

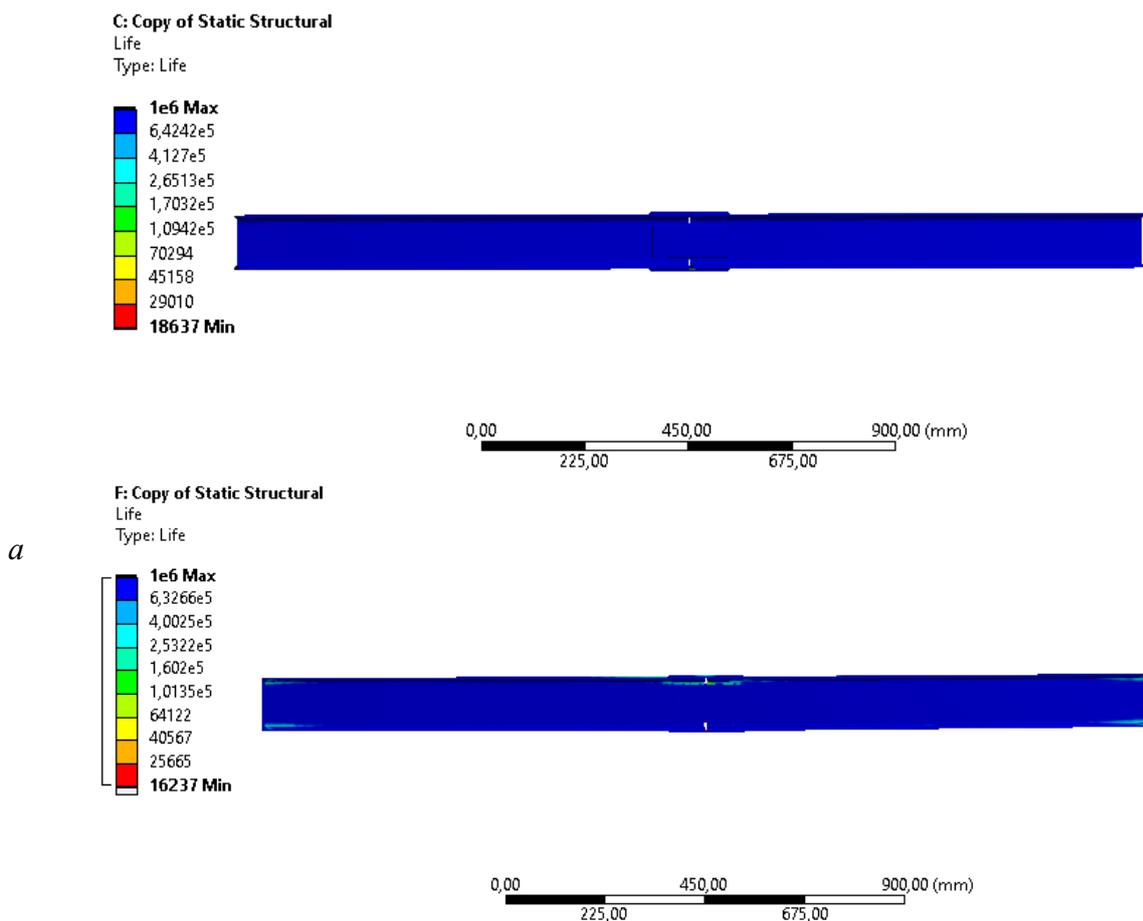
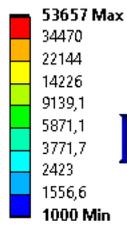


Рис. 5. Результаты циклического расчета двутаврового и таврового соединений: *a* – схема срока службы сварного двутаврового и таврового соединений, *б* – схема усталостного повреждения сварного двутаврового и таврового соединений, *в* – схема коэффициента запаса прочности сварного двутаврового и таврового соединений

C: Copy of Static Structural

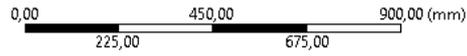
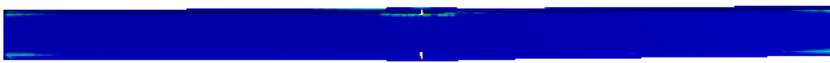
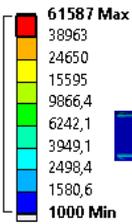
Damage
Type: Damage



6

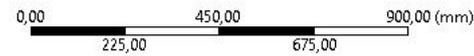
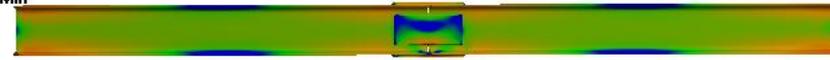
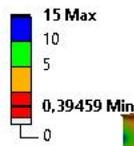
F: Copy of Static Structural

Damage
Type: Damage



C: Copy of Static Structural

Safety Factor
Type: Safety Factor



6

F: Copy of Static Structural

Safety Factor
Type: Safety Factor

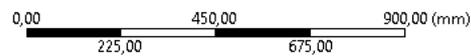
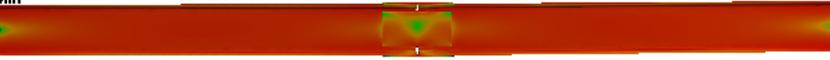
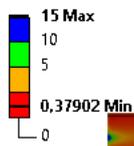


Рис. 5. (окончание)

Закключение. Испытания в среде ANSYS проведены для сварного узла соединения двутавровой и тавровой балки. Показан характер передачи усилий в рассмотренных узлах, учтены конструктивные особенности сварных узлов.

В результате испытаний было выявлено, что непрерывный сварной шов имеет более высокую усталостную прочность, чем прерывистый сварной шов, и что начальная трещина в обоих видах шва в основном распространяется от корня шва. Усталостная прочность, когда начальная трещина начинается в корне шва, выше, чем когда трещина начинается в носке шва. Усталость сварного шва можно считать самым слабым звеном процесса разрушения, когда наихудшая комбинация напряжений, дефектов и свойств материала приводит к зарождению трещины. Таким образом, более короткие сварные швы демонстрируют худшие усталостные характеристики, чем более длинные.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вольмир А. С. Устойчивость деформируемых систем / А. С. Вольмир. – М. : Наука, 1967. – 984 с.
2. Дарков А. В. Строительная механика / А. В. Дарков Н. Н. Шапошников. – М. : Высш. Шк., 1986. – 607 с.
3. Перельмутер А. В. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа / А. В. Перельмутер В. И. Сливкер. – М. : Изд-во: ДМК Пресс, 2002 г. – 618 с.
4. Лещенко, А. П. Фундаментальная строительная механика упругих систем / А. П. Лещенко. – М. : Издательство ЛКИ, 2008 – 976 с.
5. Дьяков, И. Ф. К расчету оболочки, укрепленной тонкостенными стержнями /И. Ф. Дьяков С. А. Чернов. // Автоматизация и современные технологии. – 2008. – № 1. – С. 16–20.
6. Басов, К. А. ANSYS в примерах и задачах / К. А. Басов; под ред. Д. Г. Красковского. – М. : КомпьютерПресс, 2002. – 223 с.
7. Конструирование зданий и сооружений. Легкие стальные тонкостенные конструкции: учеб. руководство / Н. И. Ватин [и др.]. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – 266 с.
8. Икрин В. А. Соппротивление материалов с элементами теории упругости и пластичности : учебник для студентов, обучающихся по направлению 653500 «Строительство» / В. А. Икрин. – М : Изд.АСВ, 2004. – 424 с.
9. Проектирование стальных конструкций: ТИП 1993–1–9–2009 – Введ. 10.12.09 – Минск, 2021. – 89 с.

Поступила: 05.03.2023