

DOI: 10.53078/20778481_2023_2_54

УДК 621

В. А. Попковский, А. И. Кочугин, В. А. Лишанков

МИНИМИЗАЦИЯ МЕТАЛЛОЕМКОСТИ ПОЛОЙ ПОЛОСЫ, ИЗГОТОВЛЕННОЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИЙ АДДИТИВНОГО СИНТЕЗА

V. A. Popkovsky, A. I. Kochugin, V. A. Lishankov

MINIMIZING METAL INTENSITY OF A HOLLOW STRIP MANUFACTURED BY MEANS OF ADDITIVE SYNTHESIS TECHNOLOGIES

Аннотация

Представлены результаты компьютерного моделирования методом конечных элементов полой полосы, подверженной воздействию изгибающей нагрузки при обеспечении требований прочности и жесткости, осуществляемого с целью минимизации материалоемкости данного изделия.

Ключевые слова:

компьютерное моделирование, метод конечных элементов, напряженно-деформированное состояние, минимизация материалоемкости, технологии аддитивного синтеза.

Для цитирования:

Попковский, В. А. Минимизация металлоемкости полой полосы, изготовленной с использованием технологий аддитивного синтеза / В. А. Попковский, А. И. Кочугин, В. А. Лишанков // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2023. – № 2 (79). – С. 54–64.

Abstract

The paper presents results of finite element method-based computer modeling of a hollow strip which is subjected to a bending load with ensuring requirements for strength and rigidity. The purpose of simulation is to minimize the material intensity of this product.

Keywords:

computer simulation, finite element method, stress-strain state, material intensity minimization, additive synthesis technologies.

For citation:

Popkovsky, V. A. Minimizing metal intensity of a hollow strip manufactured by means of additive synthesis technologies / V. A. Popkovsky, A. I. Kochugin, V. A. Lishankov // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2023. – № 2 (79). – P. 54–64.

Введение

Применение аддитивных технологий вполне обоснованно, когда изготовление объекта с использованием стандартных практик либо вообще неосуществимо, либо предполагает значительные затраты трудовых ресурсов и сырья, а следовательно, финансово нецелесообразно.

Одним из направлений увеличения объемов использования технологий ад-

дитивного синтеза является определение оптимальных геометрических характеристик изделия, позволяющих минимизировать материалоемкость продукции при обеспечении требований по прочности и жесткости. Такая оптимизация может в ряде случаев привести к получению конструктивных характеристик изделия, производство которого возможно лишь с использованием технологий аддитивного синтеза. В качестве примера обоснования такого рода

перехода на новые технологии была рассмотрена полоса листа, подвергнутая воздействию нагрузки, перпендикуляр-

ной плоскости полосы, т. е. работающей на изгиб (рис. 1).

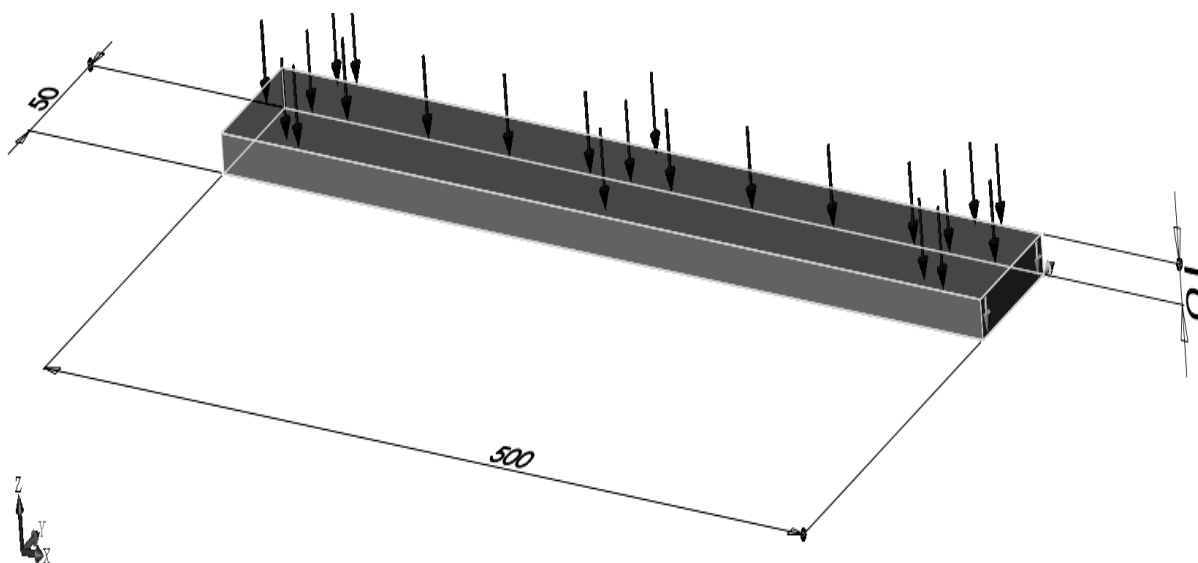


Рис. 1. Расчетная схема полосы листа, работающей на изгиб

Компьютерное моделирование объекта исследований

Для проведения анализа работоспособности рассматриваемого изделия использовался пакет прикладных программ Solid Works, в рамках которого реализован алгоритм численного метода – метода конечных элементов, хорошо себя зарекомендовавшего при решении сложных прикладных задач [1, 2].

На первом этапе исследования рассматривалась сплошная полоса под действием поперечной нагрузки. В результате была получена эпюра распределения нормальных напряжений по поверхности полосы (рис. 2). Здесь следует отметить, что имеются в виду нормальные напряжения, направление действия которых перпендикулярно плоскости поперечного сечения полосы.

На рис. 3 указаны узловые точки, в которых посредством зондирования определялись значения действующих напряжений.

По результатам полученных дан-

ных был построен график изменения напряжений по высоте поперечного сечения полосы в указанных узловых точках (см. рис. 3). Из анализа этого графика становится очевидным, что срединная часть по толщине полосы существенно недогружена, здесь напряжения близки к нулевым значениям (см. рис. 3).

Кроме указанной информации, были получены сведения о значениях прогибов полосы под действием поперечной нагрузки (рис. 4).

На основании полученных результатов расчетов можно прийти к заключению о том, что материал срединной по высоте поперечного сечения части используется неэффективно и данный материал без особого ущерба может быть удален. Исходя из этого было предложено изготавливать лист не сплошным, а с шарообразными выточками, как показано на рис. 5. На данном рисунке показано сечение кубика размером $10 \times 10 \times 10$, в котором произведена шарообразная выточка диаметром $d = 8$ мм. В последующем, сочленя та-

кие пустотелые кубики в единую сборку (рис. 6), можно получить полосу, аналогичную приведенной на рис. 1.

Представление полосы листа в виде сочленения отдельных полых кубиков в единое целое осуществлялось

здесь только с целью удобства моделирования, а накладываемые условия сочленения кубиков обеспечивали полностью адекватное поведение со сплошной полосой (см. рис. 6).

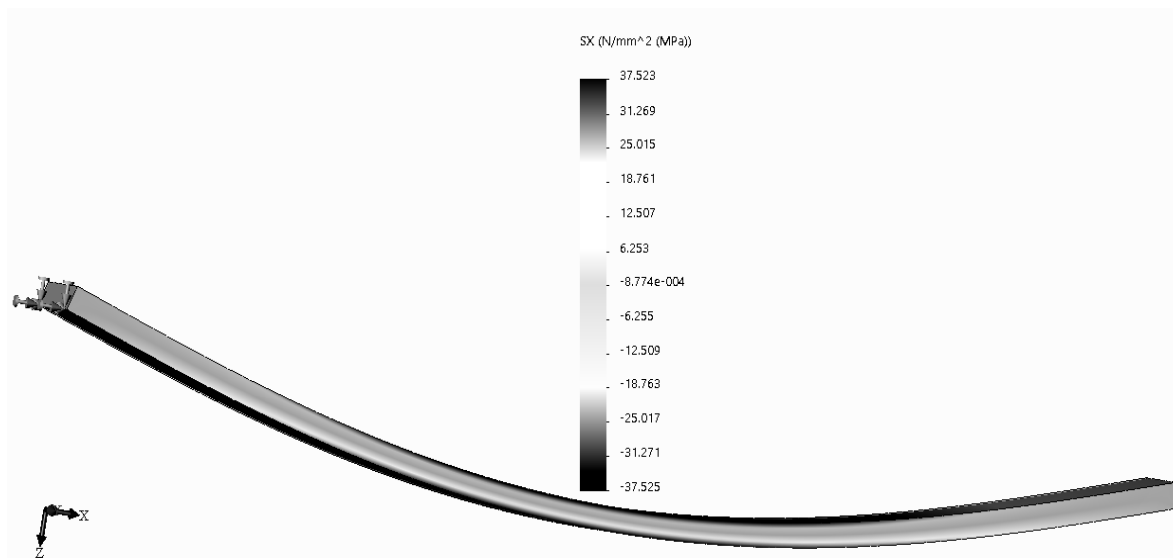


Рис. 2. Распределение нормальных напряжений по поверхности полосы, подвергнутой поперечному изгибу

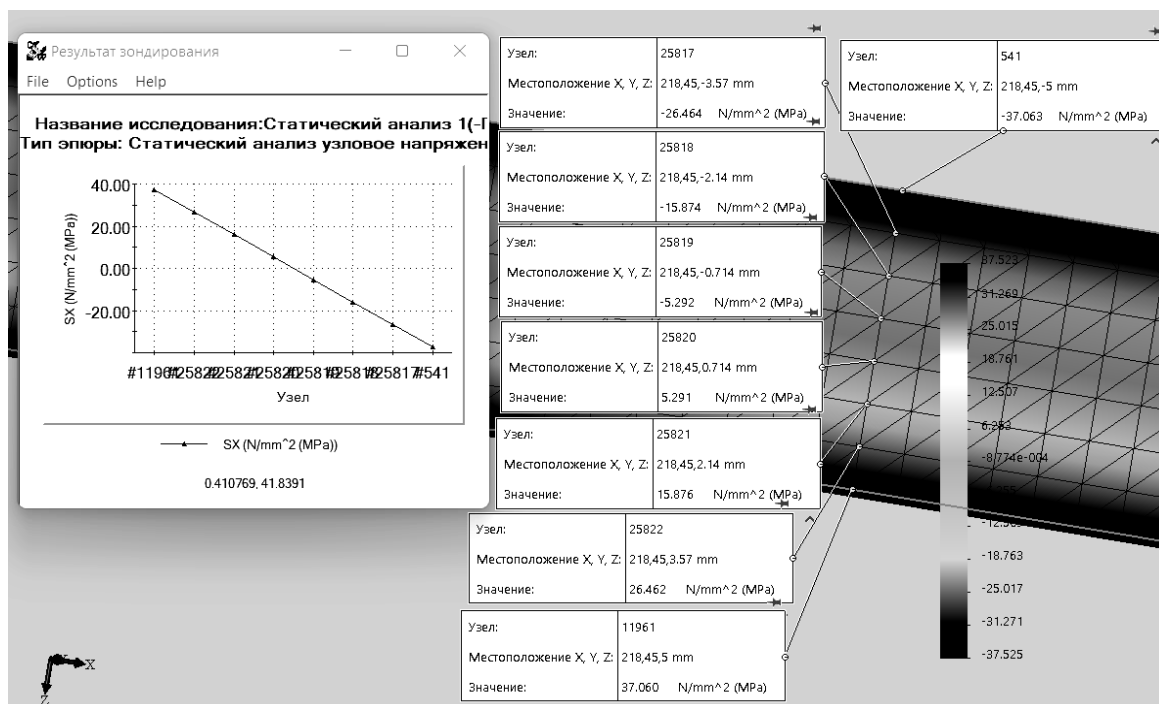


Рис. 3. Узловые точки и действующие в них напряжения

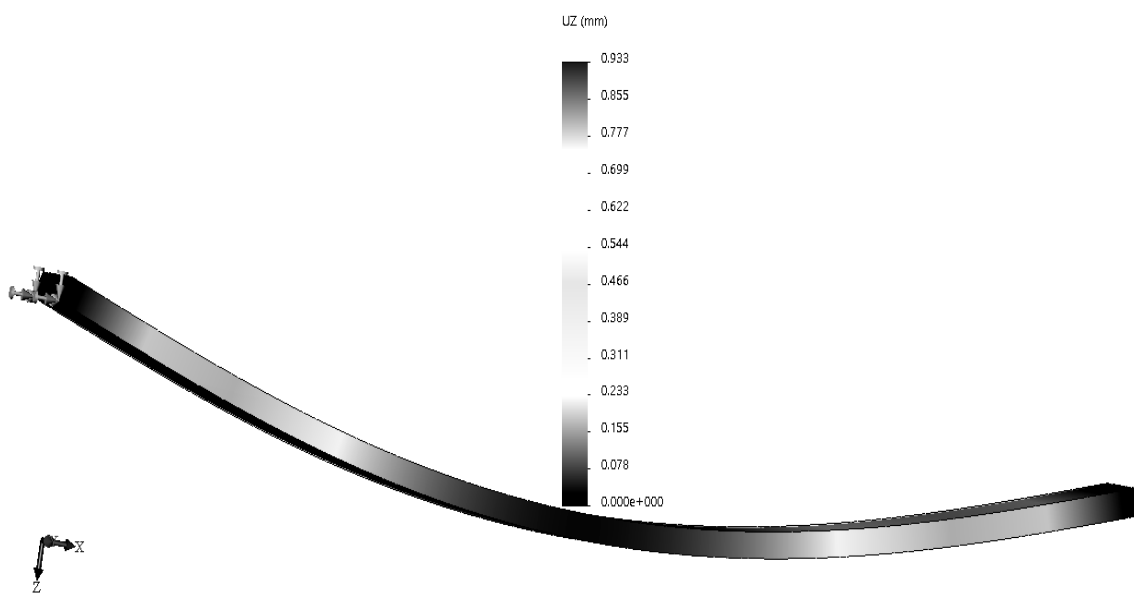


Рис. 4. Эпюра прогибов полосы под действием поперечной нагрузки

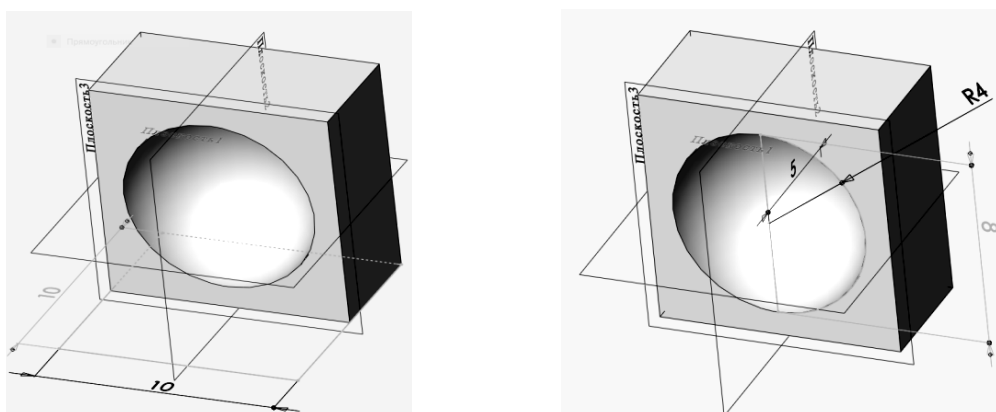


Рис. 5. Кубик материала полосы со сферической выточкой

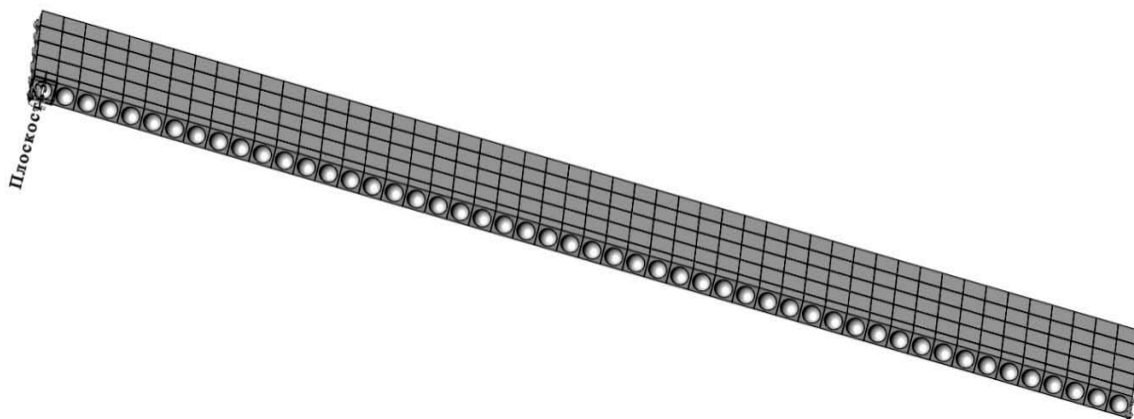


Рис. 6. Представление полосы посредством сочленения полых кубиков

Данное мероприятие позволило снизить материалоемкость полосы на 26 %.

Следует отметить, что изготовление такого варианта полосы становится возможным только посредством использования технологии аддитивного синтеза. В дальнейшем производился расчет напряженно-деформированного состояния данного варианта полосы по расчетной схеме (рис. 7), полностью

аналогичной приведенной на рис. 1. Разработанная для анализа конечно-элементная модель исследуемого объекта содержала в себе 532 351 узловую точку, 1 597 053 степени свободы и 2 702 451 конечный элемент, что представляет собой довольно объемную задачу, требующую значительных затрат машинного времени.

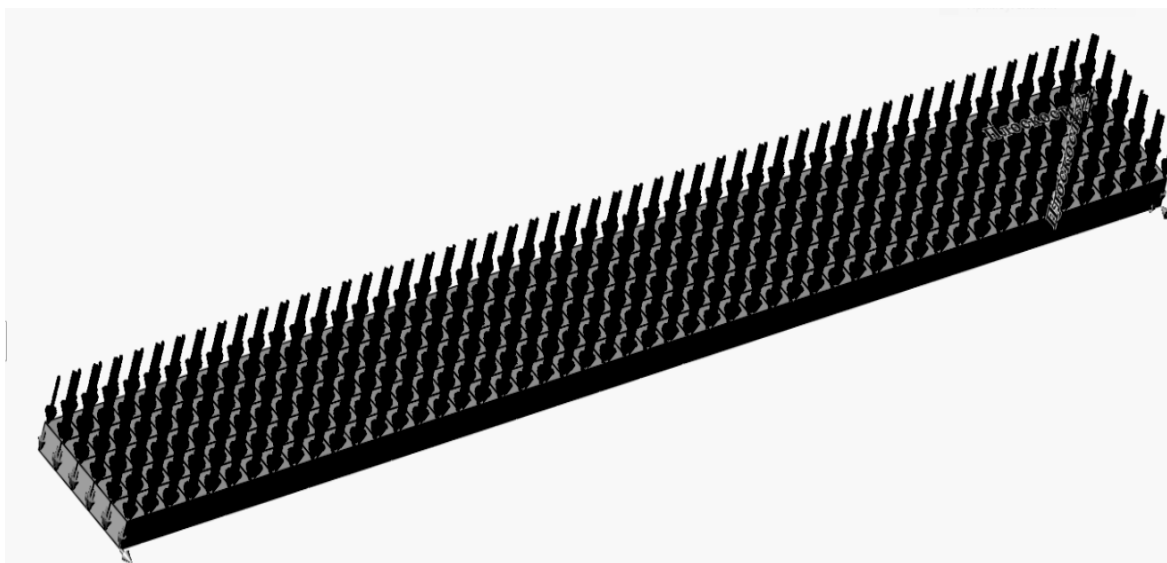


Рис. 7. Расчетная схема, используемая для анализа поллой полосы

На рис. 8 и 9 приведены соответственно эпюры прогибов поллой полосы от действия поперечной нагрузки и эпюра напряжений. В сопоставлении с аналогичными эпюрами для сплошной полосы (см. рис. 4 и 3) можно заключить, что прогибы поллой полосы и напряжения, действующие в ней, превышают значения в сплошной полосе, т. е. жесткость ее ниже, чем у сплошной. Следует отметить, что выбранные в данном случае размеры выточек, их расположение и форма рассматривались как первое приближение подбора оптимального варианта.

На следующем этапе рассматривалась полоса со сферическими выточками диаметром 6 мм, выполненными в шах-

матном порядке (рис. 10), снижение массы при этом составляло 20 %. Анализ напряженно-деформированного состояния такой полосы показал, что значения напряжений и прогибов (рис. 11 и 12) существенно снизились по сравнению с предыдущим вариантом (см. рис. 8 и 9), но тем не менее были еще выше, чем у сплошной полосы (см. рис. 3 и 4).

Следующим вариантом рассматриваемых выемок являлся эллипсоид вращения. В процессе проводимых исследований рассмотрено значительное количество типоразмеров эллипсоидов, в результате был выбран эллипсоид с размерами осей 3×11 мм. На рис. 13 и 14 приведены различные виды полосы с эллиптическими выемками.

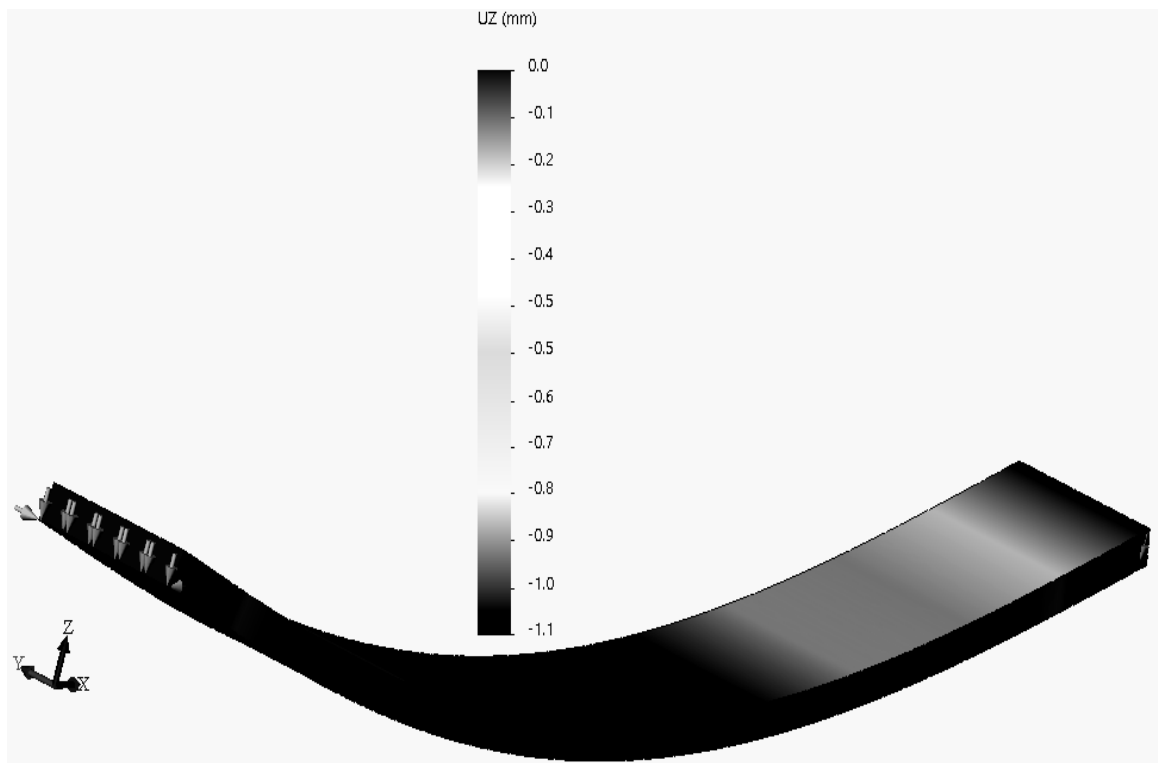


Рис. 8. Эпюра прогибов полрой полосы

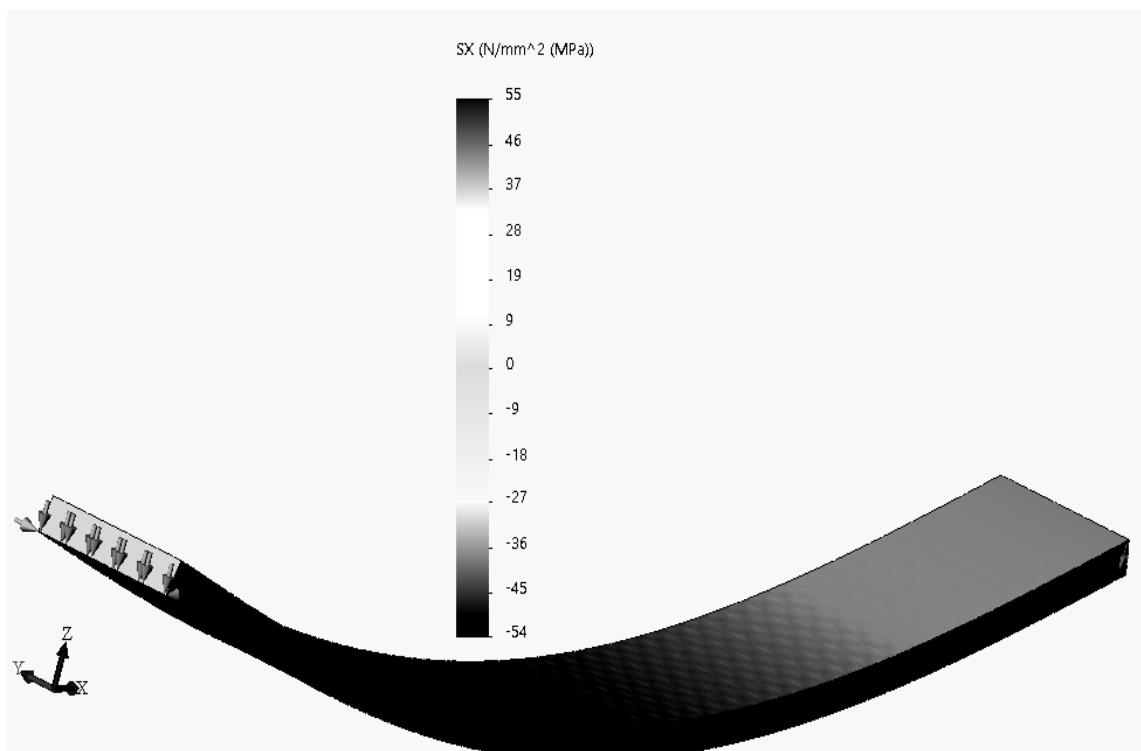


Рис. 9. Эпюра распределения нормальных напряжений

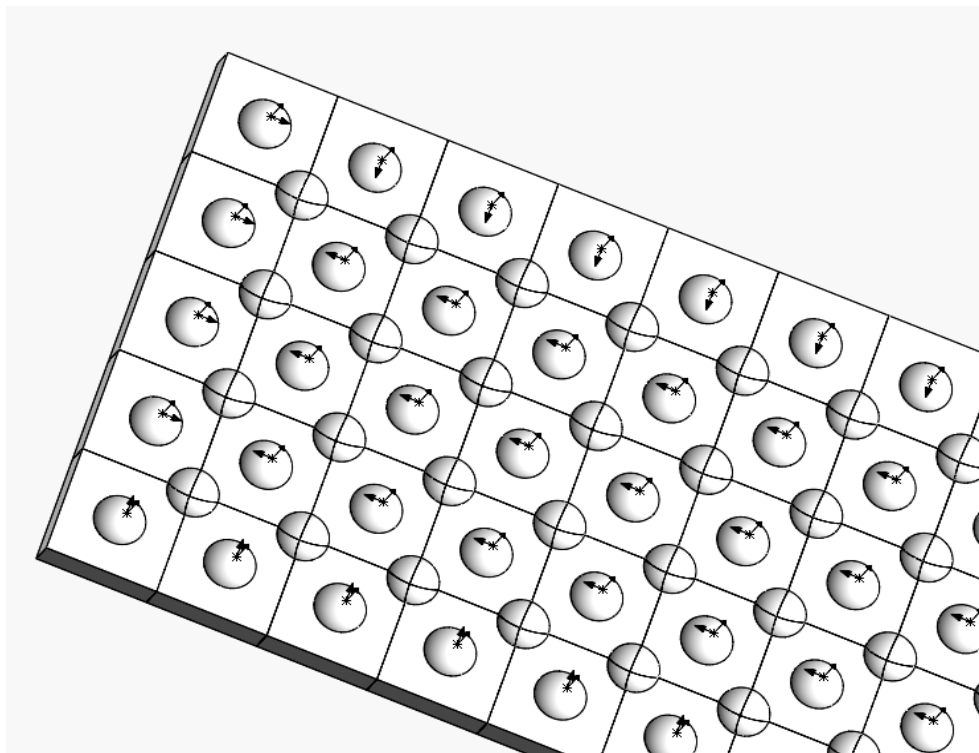


Рис. 10. Расположение сферических выемок в шахматном порядке



Рис. 11. Эпюра распределения нормальных напряжений в пластине со сферическими выемками, расположенными в шахматном порядке

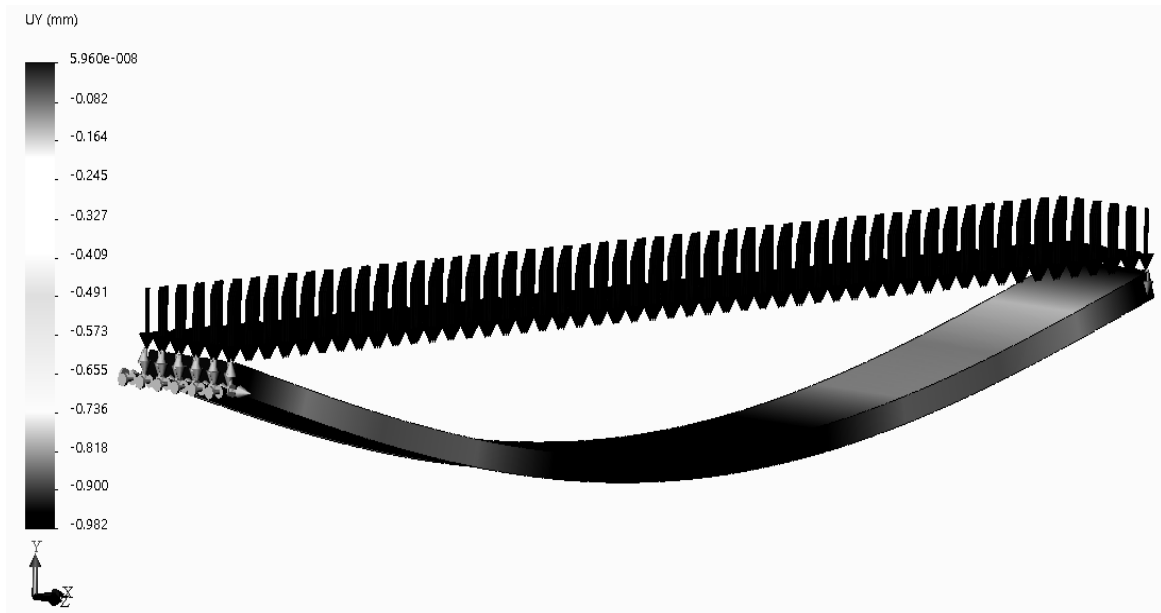


Рис. 12. Эпюра распределения прогибов в пластине со сферическими выемками, расположенными в шахматном порядке

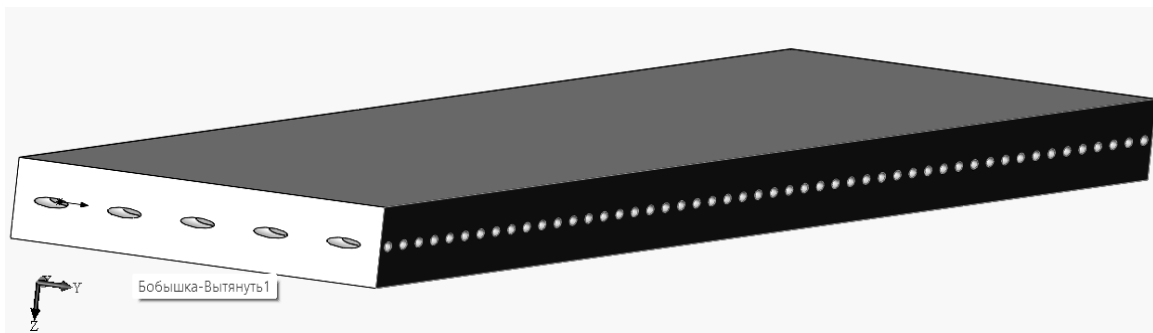


Рис. 13. Внешний вид полосы с выемками в форме эллипсоида вращения

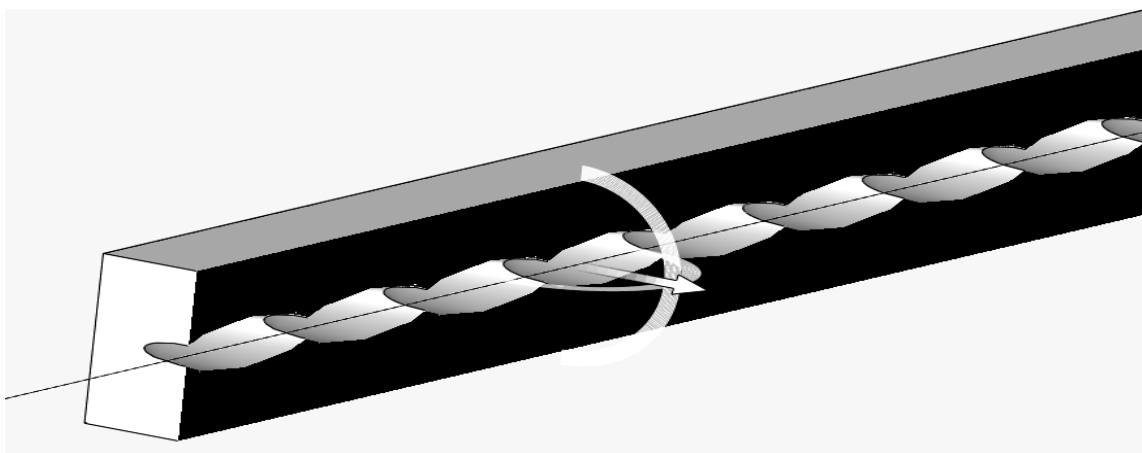


Рис. 14. Разрез полосы с выемкой в форме эллипсоида вращения

Последующий анализ полосы с выемками в форме эллипсоида вращения показал, что вес полосы в сравнении со сплошной снизился на 18 %,

а напряжения и деформации различаются незначительно (рис. 15 и 16). Так, напряжения стали больше, чем в сплошной, только на 3,2 %, а прогиб – на 1,5 %.

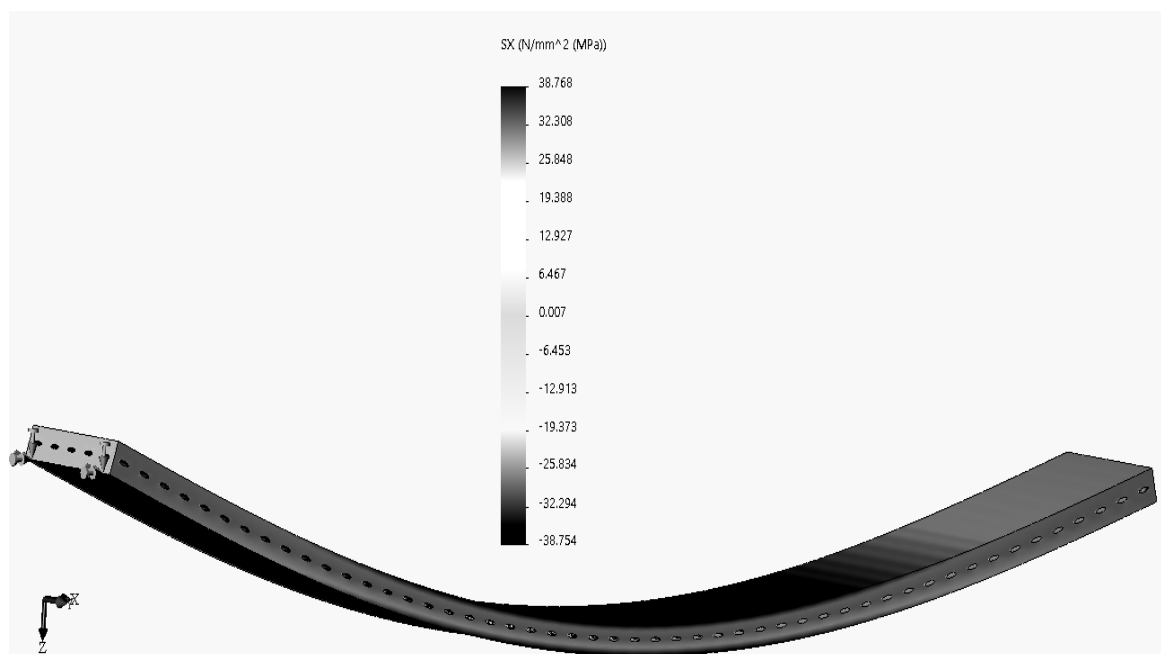


Рис. 15. Эпюра нормальных напряжений в полосе с эллипсоидными выемками

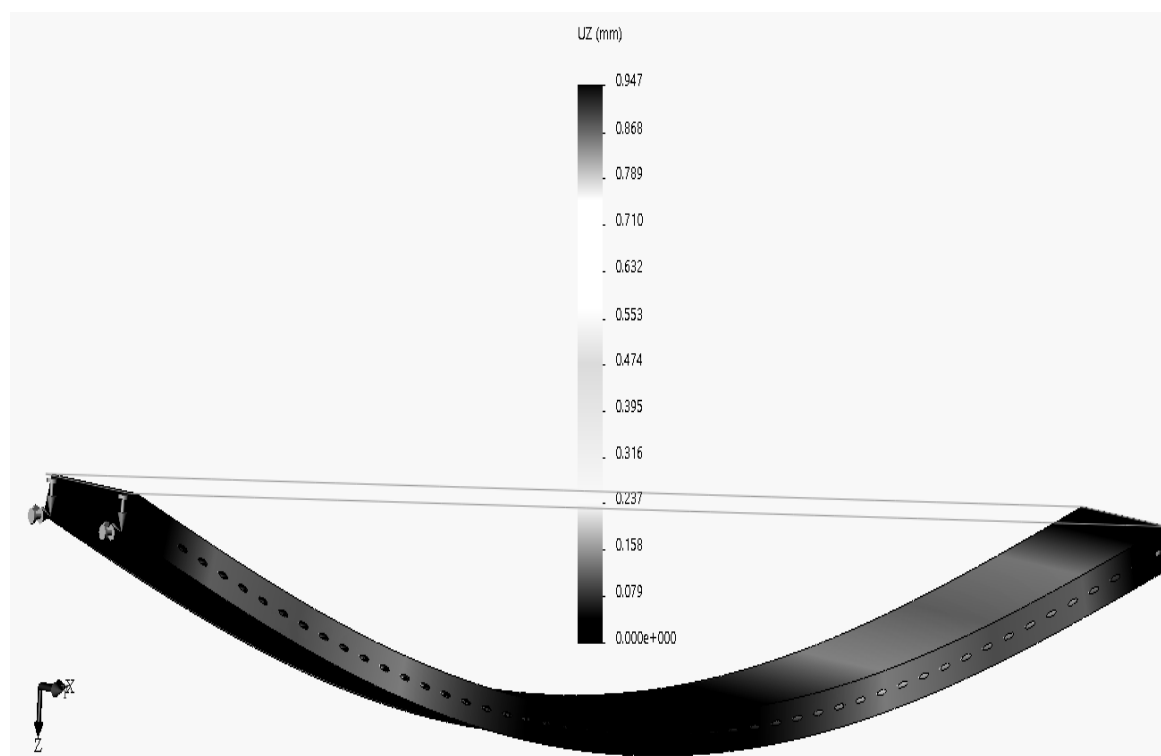


Рис. 16. Эпюра прогибов в полосе с эллипсоидными выемками

Согласно данным, полученным в курсе «Сопротивление материалов», наибольшие касательные напряжения при изгибе балок, пластин возникают в срединной по толщине пластины плоскости [3, 4], т. е. там, где пластина с выемками в наибольшей степени ослаблена. В связи с этим целесообразно ис-

пользовать показатель, для сложного напряженного состояния учитывающий все шесть компонент напряжений, действующих в точке тела. Таким показателем является интенсивность напряжений, определяемая следующим выражением [5]:

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6 \cdot (\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)}.$$

На рис. 17 приведена эпюра распределения интенсивности напряжений в полосе с эллипсоидными выемками.

В результате сопоставления данных, приведенных на рис. 15 и 17, мож-

но заключить, что основной вклад в общее напряженное состояние вносят нормальные напряжения в поперечном сечении, и по их значениям можно судить о прочности полосы с выемками.

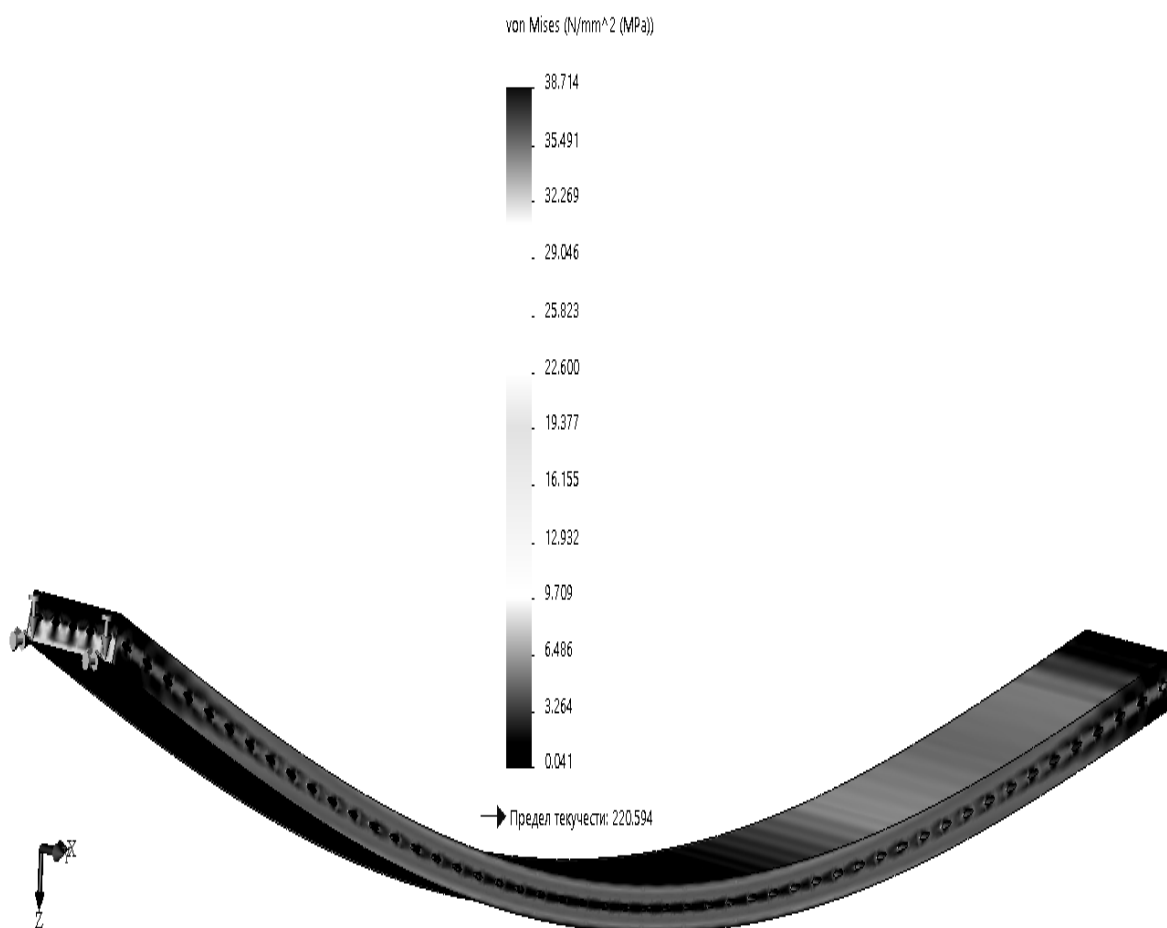


Рис. 17. Распределение интенсивности напряжений в полосе с эллипсоидными выемками

Выводы

В результате проведенного анализа можно сделать вывод о том, что полоса с эллипсоидными выемками может заменить сплошную полосу, обеспечив при этом снижение весовых показателей на 18 %.

Следует отметить, что данный вывод пока касается только одного вида нагружения полосы – действия распределенной нагрузки перпендикулярно поверхности полосы. Работоспособность данного объекта исследований при других видах нагружения будет предметом дальнейшего анализа.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Алямовский, А. А.** SolidWorks Simulation. Инженерный анализ для профессионалов: задачи, методы, рекомендации / А. А. Алямовский. – Москва: ДМК Пресс, 2015. – 562 с.: ил.
2. NX Advanced Simulation. Инженерный анализ / П. С. Гончаров [и др.]. – Москва: ДМК Пресс, 2012. – 504 с.: ил.
3. **Кузменко, И. М.** Механика материалов: учебное пособие: в 2 ч. / И. М. Кузменко. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2020. – Ч. 1. – 289 с.: ил.
4. **Кузменко, И. М.** Механика материалов: учебное пособие: в 2 ч. / И. М. Кузменко. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2020. – Ч. 2. – 281 с.: ил.
5. Сопротивление материалов с основами теории упругости и пластичности: учебник / Г. С. Варданян [и др.]; под ред. Г. С. Варданяна. – 2-е изд., испр. и доп. – Москва: ИНФРА-М, 2011. – 638 с.

Статья сдана в редакцию 1 марта 2023 года

Виктор Александрович Попковский, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет.

Андрей Игоревич Кочугин, студент, Белорусско-Российский университет.

Вячеслав Александрович Лишанков, студент, Белорусско-Российский университет.

Viktor Aleksandrovich Popkovsky, Cand. Sc. (Tech.), Associate Professor, Belarusian-Russian University.

Andrey Igorevich Kochugin, student, Belarusian-Russian University.

Vyacheslav Aleksandrovich Lishankov, student, Belarusian-Russian University.