

В. В. Ткаченко, зав. лабораторией, канд. техн. наук;
С. И. Утехин, ведущий инженер-конструктор
(ОИПИ НАН Беларуси, г. Минск)

ТОПОЛОГИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ДЕТАЛЕЙ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА НА ПРИМЕРЕ БАЛКИ С ПЕРЕМЕННОЙ ПОРИСТОСТЬЮ

Аддитивные технологии 3D печати, в отличие от традиционных методов механообработки, позволяют изготавливать детали со сложной геометрией, общий вес которых можно снизить за счет оптимизации формы детали по результатам цифрового моделирования или виртуальных испытаний «цифрового двойника» будущего изделия.

Такие возможности могут быть реализованы с использованием инструментов программных приложений CAD/CAE. Среди наиболее известных – программные приложения DesignSpace от Ansys, Tosca от Dassault Systèmes, «Оптимизация» из COMSOL Multiphysics, APM FEM из Компас-3D, Autodesk Within Labs и SolidThinking Inspire. Интернет содержит много примеров оптимизации топологии деталей с изменением их геометрии. И как свидетельствует практика, поиск оптимальных проектных решений остается не простой задачей, требующей от конструктора достаточно глубоких теоретических знаний, позволяющих ему правильно интерпретировать результаты цифрового моделирования.

В простейшем случае используется цифровая модель проектируемой или уже существующей детали, к которой будет прикладываться различная нагрузка (например, давление на фиксирующие выступы). Лишний материал в тех частях детали, которые не испытывают нагрузки и не влияют на прочность, подлежит удалению с целью уменьшения массы детали или экономии материала. Форма детали после такого «отсечения» по некоторому пороговому уровню напряжений может оказаться достаточно сложной для традиционных технологий механообработки или литья и, следовательно, потребует проведения уточняющих расчетов прочности для детали с технологически приемлемой формой, выбор которой остается за конструктором.

Технологии 3D печати дают больше возможностей для воплощения результатов оптимизации, в том числе не только за счет отсутствия препятствий к получению необходимой формы детали, но и за счет создания некоторых пустот или придания пористости в её объеме. При этом сама задача оптимизации может быть сформулирована

как задача получения равной прочности в каждой элементарной ячейке всего объема детали.

Подобная задача решается в сопротивлении материалов. Как пример можно указать на методику расчета балки *равного сопротивления изгибу*, момент сопротивления которой изменяется по длине в том же отношении, что и изгибающий момент [1]. Методика расчета опирается на эмпирически подтвержденную применимость расчетных формул, полученных для призматических брусьев, также для балок переменного поперечного сечения, если только изменение сечения по длине не является слишком резким. Согласно [1], постоянство нормального напряжения по всей длине балки, нагруженной на ее конце, и равенство его допускаемому для выбранного материала напряжению соблюдается, когда момент сопротивления в поперечном сечении балки пропорционален расстоянию до опоры. Такое условие открывает путь для экономии материала, так как поперечное сечение принятой формы можно уменьшать вдоль балки, сохраняя при этом заданную прочность.

На рисунках 1, 2 и 3 показаны результаты проведенного нами в программном приложении SolidWorks моделирования прочности балки, закрепленной с одного ее конца и нагруженной с другого, при условии, что изменение поперечного сечения достигается градиентом его заполнения. В отличие от примера, представленного на странице [2], «облегчение», выполненное с применением инструментов SolidWorks, получено не за счет придания ажурности конструкции, требующей непростой механообработки, а за счет градиента внутренней пористости или изменения заполнения материалом внутреннего объема ячеек. При этом сохраняются внешние геометрические формы детали, что может быть определяющим фактором при проектировании, например, облегченных конструкций с заданной внешней формой, например, обтекателя (крыла).

Граничными условиями для выбранной модели закрепленный конец балки фиксирован своим торцом к неподвижной опоре, на которую балка свободно опирается и может относительно выступающего края опоры свободно перемещаться при деформации. В результате «облегчения» при уменьшении заполнения ячеек на конце балки до 0,64 их объема (рисунок 1) получено уменьшение полной массы ее консольной части на 32% при сохранении коэффициента запаса прочности 18,6 в точке опоры, как и для исходного варианта со сплошным заполнением объема балки.

При уменьшении заполнения ячеек на конце балки до 0,68 их объема (рисунок 3), что соответствует снижению ее массы почти на

34 %, коэффициент запаса прочности в точке опоры уменьшился незначительно, до 12, а в зоне приложенного усилия – до 4,5.

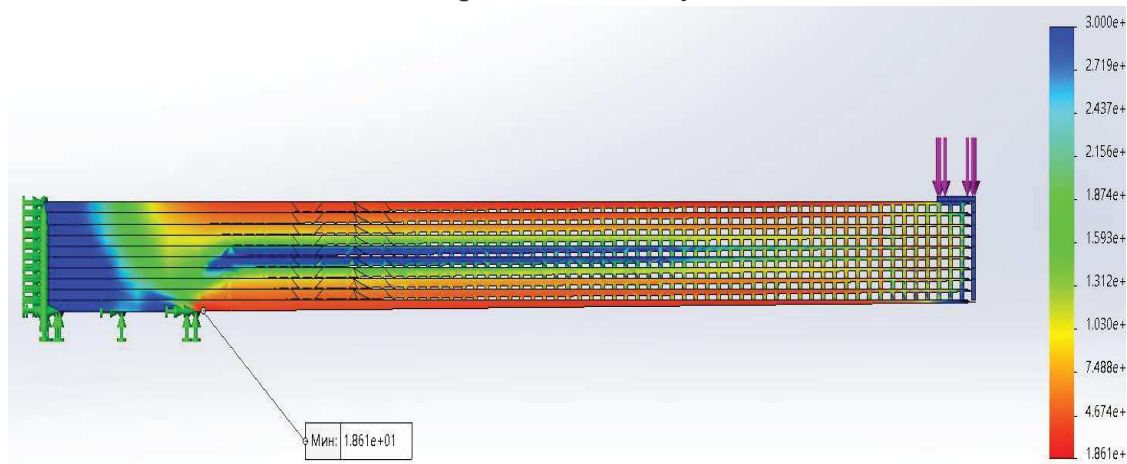


Рисунок 1 – Диаграмма запаса прочности для балки с уменьшение объемного заполнения ячеек (увеличением пористости) от 1 до 0,64

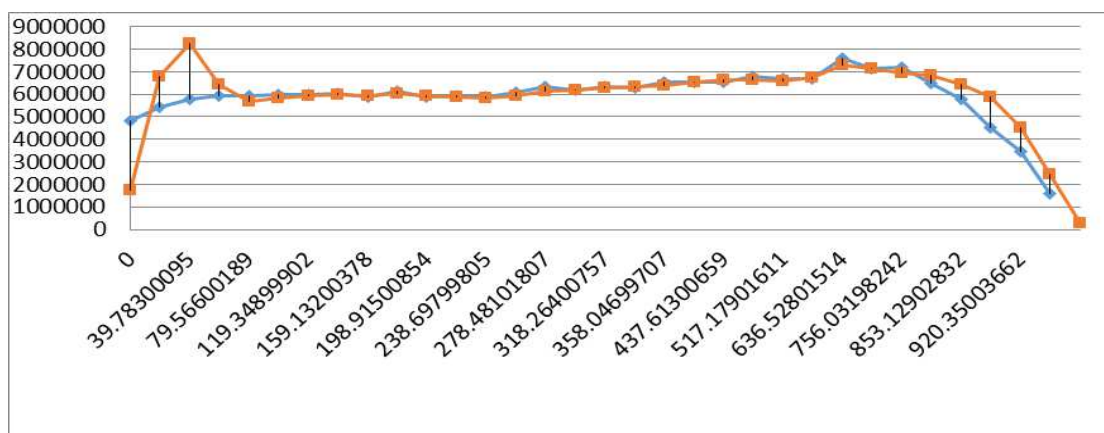
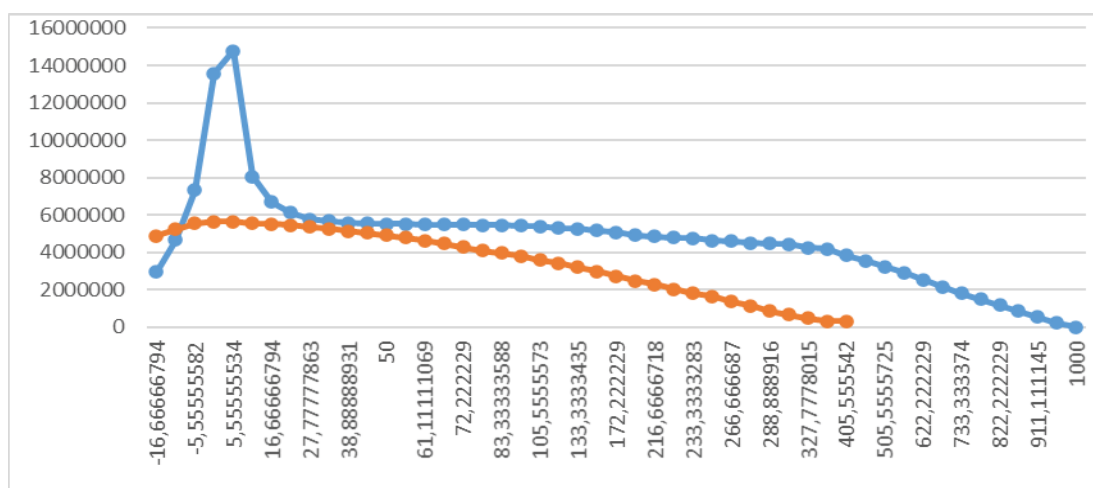


Рисунок 2 – Распределения напряжений вдоль верхней и нижней кромок для сплошной балки и для балки с продольным градиентом объемной пористости от 1 до 0,64

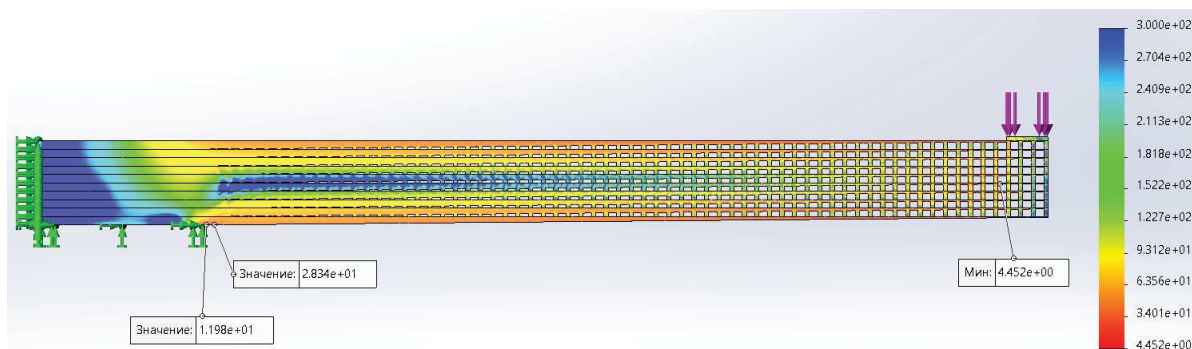


Рисунок 3 – Диаграмма запаса прочности для балки с уменьшением объемного заполнения ячеек (увеличением пористости) от 1 до 0,68

Проведенное моделирование на простом примере показало целесообразность использования для решения таких задач суперкомпьютерных конфигураций – временные затраты для одного расчета на настольном компьютере офисного назначения составили 2 часа. При этом, как следует из приведенных на рисунках 1 и 3 диаграмм, возможности дальнейшей оптимизации конструкции далеко не исчерпаны. Существенное уменьшение массы может быть получено удалением сердцевины балки.

Данный процесс включает в себя анализ нагрузок, которые испытывает деталь во время работы, позволяющий определить места, в которых возможно удаление массы, и требуют нескольких циклов расчета, дающих последовательное приближение к рациональному варианту.

Закключение. Представленная модель, в которой использован линейный закон изменения заполнения ячеек пористой конструкции, демонстрирует необходимость учета нелинейных свойств материала под действием реальной нагрузки и важности корректного задания граничных условий, при которых топологическая оптимизация виртуального объекта может быть использована в качестве ориентировочного или концептуального инструмента для создания детали на основе объемной конструкции или же для улучшения работоспособности существующей конструкции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Молотников В.Я. Курс сопротивления материалов / В.Я. Молотников. – СПб.: Издательство «Лань», 2021. – 384 с.
2. Dassault Systèmes [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: [tps://render.ru/3DS/post/15676?ysclid=lqju8rbpoz780018038](https://render.ru/3DS/post/15676?ysclid=lqju8rbpoz780018038) (дата обращения 08.01.2024).