

наблюдаемые ряды, а также для моделирования погоды на территориях, не освещенных данными метеорологических и гидрологических наблюдений.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Смит, Д. М. Модели в экологии / Д. М. Смит. – М. : Мир, 1976. – 184 с.
2. Semenov MA, Barrow EM (1997) Use of a stochastic weathergenerator in the development of climate change scenarios. *Clim Change* 35:397–414.
3. Richardson, C. W., and D. A. Wright. 1984. WGEN: A Model for Generating Daily Weather Variables. U. S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, ARS-8, 83 p.
4. Matalas, N. C. 1967. Mathematical assessment of synthetic hydrology. *Water Resources Res.* 3(4):937, 945.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ И ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕМЕНТАХ КОНСТРУКЦИЙ

## MODELING AND VISUALIZATION OF PROCESSES IN UNITS OF CONSTRUCTIONS

**В. И. Красовский, Е. П. Черевань**  
**V. Krasovsky, E. Cherevan**

*Белорусский государственный университет, МГЭИ им. А.Д. Сахарова БГУ,  
Г. Минск, Республика Беларусь  
vikras@iseu.by*

*Belarusian State University, ISEI BSU, Minsk, the Republic of Belarus*

Использование моделей различных элементов конструкций позволяет упростить расчеты сложных изделий, которые составляют большинство в отраслях, связанных с производством энергетических устройств и узлов, встроенных в технологические процессы при производстве различных видов энергии. Визуализация воздействия на элементы изделий различных видов нагрузок позволяет обучающимся наглядно фиксировать протекание процессов, влияющих на механическую прочность, моделируя различные входные данные.

The use of modules of various structural elements makes it possible to simplify the calculations of complex products that make up the majority in industries related to the production of energy devices and devices embedded in technological processes in the production of various types of energy. Visualization of the impact on the elements of products of various types of deformation allows students to visually record the flow of processes that affect the mechanical strength by modeling various input data.

*Ключевые слова:* деформация, прочность, изгиб, программное обеспечение, поля напряжений, внутренние силы, анимация.

*Keywords:* deformation, strength, bending, software, stress fields, internal forces, animation.

<https://doi.org/10.46646/SAKH-2021-2-296-299>

При изучении процессов деформации, связанных с освоением дисциплины «Прикладная механика» студентами специальностей «Энергозэффективные технологии и энергетический менеджмент» и «Ядерная и радиационная безопасность», часто возникают затруднения в понимании местонахождения наиболее опасных участков изделий с точки зрения их механической прочности.

Конкретные изделия, с которыми приходится сталкиваться инженерам, представляют общепринятыми элементами: брусьями, балками, стержнями, пластинами. Поведение этих элементов в зависимости от их геометрических размеров и параметров внешних воздействий с трудом прогнозируется не только обучающимися, но и специалистами высокого уровня. Для понимания процессов, происходящих внутри элементов конструкций, предлагается на примере наиболее распространенных видов деформации в дисциплине «Прикладная механика», раздел «Сопротивление материалов», рассмотреть модели и визуализацию возникающих перемещений и напряжений.

Для визуализации процессов при различных видах деформации было использовано программное обеспечение Ansys Mechanical Structural, находящееся в открытом доступе. Программный пакет Ansys Mechanical Structural (<https://www.ansys.com/>) [1] предназначен для расчета конструкций. Он позволяет решать сложные инженерные задачи и принимать качественные и быстрые проектные решения. С помощью решателей анализа методом конечных элементов (FEA), поддерживаемых программой, возможно настраивать и автоматизировать решения задач, возникающих в различных сферах научных исследований и производства. При помощи Ansys Mechanical Structural становится возможной визуализация многих физических явлений и эффектов. При этом, в большинстве случаев, данные, полученные в ходе моделирования, практически совпадают с реальными значениями. В связи

с этим программный пакет является удобным инструментом для эффективного осваивания учебного материала, так как даёт максимально наглядное и подробное представление об изучаемых явлениях и эффектах. С помощью Ansys Mechanical Structural учащийся имеет возможность создать модель требуемого эксперимента и в кратчайшие сроки получить результат исследования без проведения натурного опыта. По завершению исследований, с помощью инструментов Ansys Mechanical Structural существует возможность создания анимации исследуемых явлений в формате видеоролика, а также возможность импортировать визуализированные характеристики исследований в формате изображения для дальнейшего их использования в учебном процессе. Примером таких характеристик является поле напряжений в балке, находящейся под заданной нагрузкой. Использование моделирования с визуализацией сложных процессов, происходящих из-за влияния внутренних сил, позволяет облегчить их понимание обучающимся и понять суть происходящих процессов в изделиях. Программное обеспечение позволяет проводить моделирование практически с любым видом нагрузки. Размеры исследуемых элементов тоже могут изменяться в достаточно широких пределах.

Реализация анимации моделирования представлена на образовательном портале сайта МГЭИ им. А. Д. Сахарова БГУ (<http://e-learning.iseu.bsu.by/>) [2].

В связи с перечисленными преимуществами Ansys Mechanical Structural был выбран в исследовании в качестве базовой программы. Для подтверждения возможностей применения Ansys Mechanical Structural в учебных целях был сделан анализ и визуализация напряжений, возникающих в результате изгиба балки при использовании двух материалов, а также создан ряд видеороликов, отражающих динамику и характер изменений напряжений. На рисунках можно наблюдать испытуемый объект и градуированную шкалу, демонстрирующую соответствие значений напряжений и цвета, а также поля напряжений, возникших в результате приложения нагрузки.

При проведении исследования обучающимся предлагается следующий алгоритм действий:

1. Создание исследуемого объекта.
2. Выбор схемы крепления объекта.
3. Создание сетки и выбор граничных условий.
4. Постобработка и анализ полученных результатов.

Рассмотрим один из примеров реализации моделирования. В качестве исследуемого объекта была выбрана балка квадратного профиля, геометрические размеры которой представлены на рис. 1. В качестве материалов выбраны сталь и алюминий.

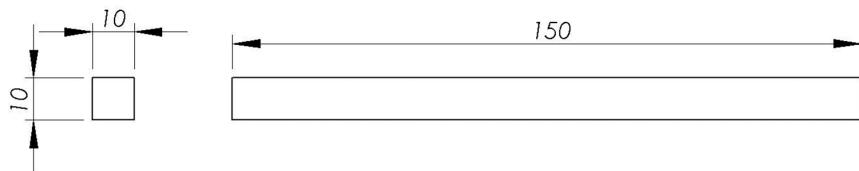


Рисунок 1. Геометрические размеры исследуемого объекта

Материалы и их характеристики были экспортированы из библиотеки Ansys. Свойствами, учитываемыми при выборе материала, являлись: плотность, модуль Юнга или модуль упругости первого рода, теплопроводность, удельная теплоёмкость, предел прочности на растяжение и максимальный предел прочности.

Для сравнительной наглядности предлагается три основные схемы крепления, а именно: заделка – шарнир, заделка – заделка и консольное закрепление. Перечисленные схемы представлены на рис.2-4. В работе, в качестве примера, использована схема, изображенная на рис.2.

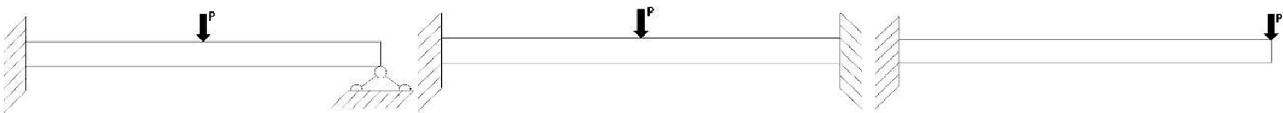


Рисунок 2. Заделка – шарнир

Рисунок 3. Заделка – заделка

Рисунок 4. Консольное закрепление

Исследуемый объект был разбит на 1900 конечных элементов размером 2\*2\*2 мм. Для создания гексаэдрической конформной сетки использована стандартная функция автоматического построения сетки. Конформная сетка – упорядоченная сетка, элементы которой удовлетворяют условию: если два элемента сетки пересекаются, то область их пересечения представляет собой их общую грань или ребро, в зависимости от вида конечного элемента (двумерный или трехмерный). Важно отметить, что полученный результат практически не должен зависеть от размера конечных элементов, что достигается проведением расчетов на сетках различной плотности. Внешний вид построенной сетки представлен на рис. 5.

С целью демонстрации применения программы в контексте учебного процесса были заданы переменные граничные условия, наглядно демонстрирующие разницу между получаемыми результатами. В качестве граничных условий были использованы различные материалы. В результате изменения таких условий студент может оценить поведение конструкций из этих материалов при прочих равных граничных условиях, что в дальнейшем

позволяет подбирать наиболее целесообразные материалы для создаваемых конструкций при определенных условиях эксплуатации.

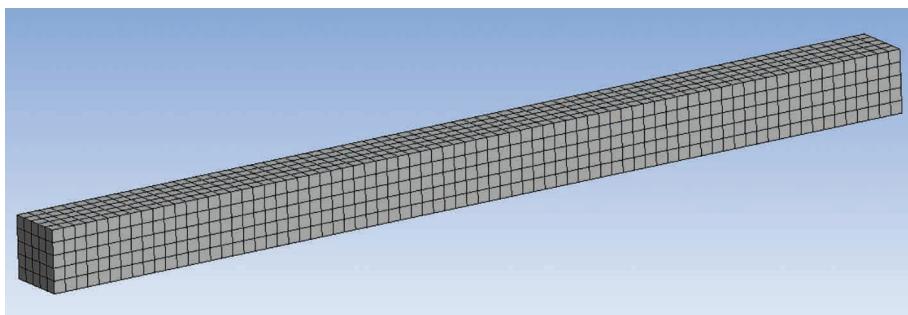


Рисунок 5. Вид построенной сетки

В работе представлены результаты исследований моделей из стали и алюминия. Время приложения нагрузки  $t=1$  секунда, характер изменения нагрузки – линейный. На рисунках, черным контуром показано начальное положение балки до деформаций.

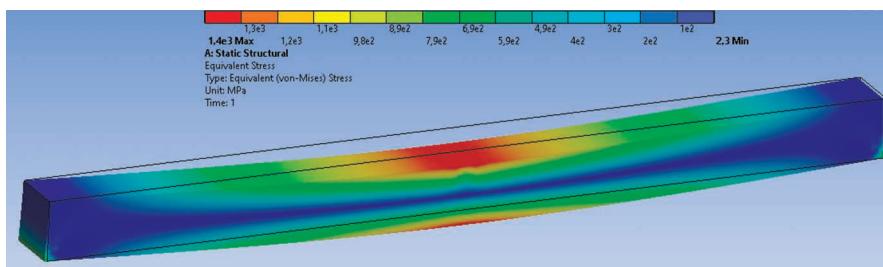


Рисунок 6. Поле напряжений на поверхности балки.  $P$  (нагрузка) = 6000 Н. Материал – сталь

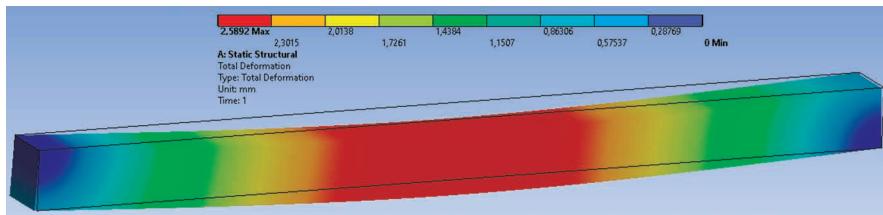


Рисунок 7. Поле перемещений на поверхности балки.  $P$  = 6000 Н. Материал – сталь

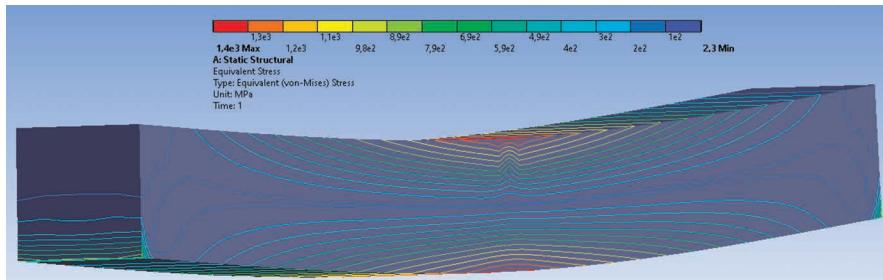


Рисунок 8. Распределение изолиний напряжений в балке.  $P$  = 6000 Н. Материал – сталь

Из рис.8 можно сделать вывод, что при указанном значении нагрузки и способе крепления балки максимальные напряжения возникают на поверхности балки. Линия определенного цвета демонстрирует расположение слоя, имеющего постоянное значение напряжения. При проведении исследований со сталью максимальное напряжение, возникающее на поверхности балки, составило 1377, 4 МПа, а максимальное перемещение- 2, 59 мм. Важно отметить, что в программе присутствует функция сечения плоскостями. Она позволяет анализировать напряжения, возникающих внутри балки. Пример подобного сечения представлен на рис. 9.

Для сравнения проиллюстрируем поведение балки из алюминия. Граничные условия оставаться неизменными. Из рис.10 можно сделать вывод, что максимальное напряжение, возникающее на поверхности балки, составляет 1381, 8 МПа. Из рис.11 видно, что максимальное перемещение при деформации равно 7, 29 мм. Характер распределения изолиний напряжений по балке в случае применения алюминия в качестве материала балки имеет вид, как и на рис.8.

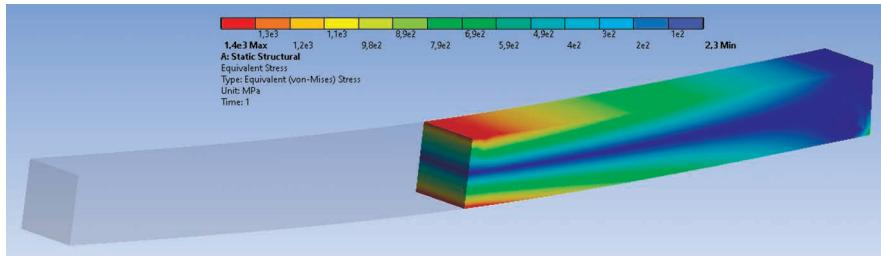


Рисунок 9. Сечение балки

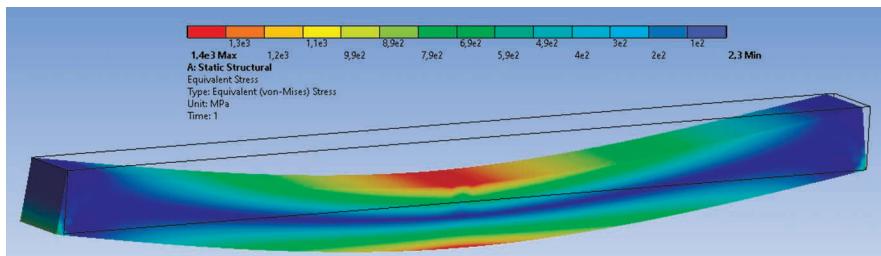


Рисунок 10 – Сечение балки с демонстрацией напряжений, возникающих в объеме.  $P = 6000$  Н. Материал – сталь.

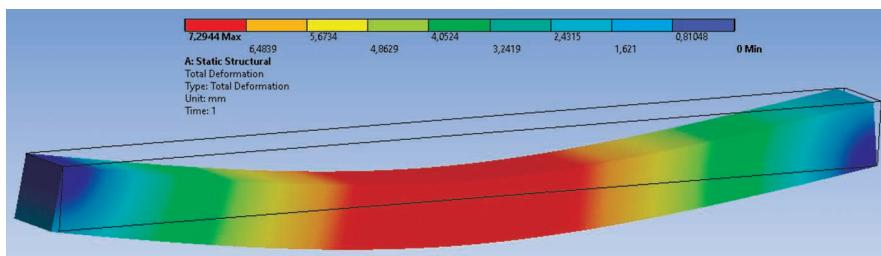


Рисунок 11. Поле перемещений.  $P = 6000$  Н. Материал – алюминий.

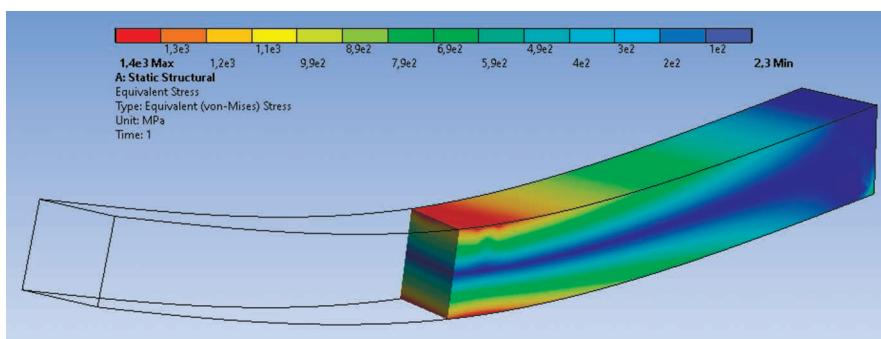


Рисунок 12. Поперечное сечение алюминиевой балки.

Полученные анимации для балок представляют цветную иллюстрацию внутреннего состояния исследуемого изделия с указанием соответствующих уровней напряжения и перемещения и изменениями их во времени.

С помощью анимации обучающийся видит, какие процессы возникают внутри элемента.

Изображения, представленные на рис. 6-12 отображают цветовую гамму явлений, происходящих при деформации и возникающих напряжениях, позволяют визуально «прочувствовать» состояние деформированного объекта.

С полученными анимациями можно ознакомиться, пройдя по ссылке [3].

Проведенное исследование позволяет надеяться, что описанные малозатратные подходы к изучению традиционных дисциплин вызовут интерес у обучающихся.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. <https://www.ansys.com/>
2. <http://e-learning.iseu.bsu.by/>
3. <https://www.youtube.com/channel/UCFouGSooBiiCFi3zrGoFEjg>