

**КОНЦЕПЦИЯ ОДНОВРЕМЕННОГО ОБУЧЕНИЯ  
СТУДЕНТОВ НАПРАВЛЕНИЯ «КОНСТРУИРОВАНИЕ МАШИН»  
ТРЕХМЕРНОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ И ВИРТУАЛЬНЫМ  
ИСПЫТАНИЯМ ПУТЕМ МКЭ-АНАЛИЗА**

**CONCEPTION OF SIMULTANEOUS TEACHING THE STUDENTS OF  
DIRECTION "MACHINE DESIGN" TO THREE-DIMENSIONAL  
MODELING AND VIRTUAL TESTING BY FEM-ANALYSIS**

**Stanisław Downar**

**Aleksander Jakimowicz**

**Czesław Jakubowski**

Białoruski Narodowy Uniwersytet Techniczny

Wydział Budowy Maszyn

220127 Mińsk, Białoruś

ul. Niezależności 65

**Andrzej Jakubowski**

Akademia Morska w Szczecinie

Zakład Mechaniki Technicznej

70-506 Szczecin,

Wały Chrobrego 1-2

e-mail: a.jakubowski@am.szczecin.pl

**Abstract:** The conception of simultaneous teaching to 3D-modeling in CAD and to virtual testing of three-dimensional constructions in CAE is suggested. On the base of real objects models the distribution of stress and strain in constructions elements is presented. The possibility of the most dangerous areas finding-out to accept the practical decisions for exit from difficult situations is shown. The value of the base skills of CAD/CAE intercommunication for students of the machine building specialties is obvious.

**Keywords:** machine building, 3D-model, virtual testing, FEM-analysis, state of stress and strain, stress concentration, contact.

**Введение**

Пятый семестр (начало III курса) традиционно является психологически трудным и переломным для студентов, обучающихся по направлению «Конструирование машин» на машиностроительном факультете Белорусского национального технического университета (БНТУ, г. Минск). Они приступают к изучению предмета «Детали машин» и впервые сталкиваются с конструированием простейших механизмов. Им прихо-

дится выполнять два сложных курсовых проекта, непосредственно касаясь базовых ситуаций, возникающих в машиностроении и требующих определенных знаний для их разрешения. Студенты должны научиться:

- определять вид нагружения детали в сборке (растяжение, изгиб, кручение и др.);
- проверять прочность детали при хрупком или вязком разрушении, при циклическом нагружении, при истирании и пр.;
- выявлять и ослаблять концентраторы напряжений в деталях;

- производить расчеты деталей на жесткость, при необходимости принимать меры по ее увеличению;

- определять недогруженные и перегруженные элементы конструкции, производить выравнивание потоков сил.

В предыдущих семестрах студенты прослушали курс «Механика материалов», но сведения о напряжениях, деформациях и прочности остаются для них пока абстракцией. Также на младших курсах они изучали проекционное черчение и начертательную геометрию. Однако еще не освоили трехмерное моделирование (CAD). Основная учебная нагрузка по этому направлению традиционно планируется на IV и V курсы обучения. В результате студенты в 5-ом семестре испытывают трудности с трехмерным представлением машиностроительных деталей и узлов, а также с их жесткостным и прочностным анализом.

Для улучшения ситуации без перестроения традиционных учебных планов в 5-ом семестре была введена дисциплина «Численные методы механики». Ее цель — одновременно научить студентов 3D-моделированию (CAD) и проведению виртуальных испытаний трехмерных конструкций (CAE) [1].

### Трехмерное моделирование и виртуальные испытания

Последовательность действий студентов в лабораторной части дисциплины заключается в следующем.

1. Строится в CAD SolidWorks деталь [2].
2. 3D-модель детали передается в CAE-пакет ANSYS [3]. Он реализует метод конечных элементов (МКЭ, FEM, FEA) [4]. При этом используется в семействе ANSYS продукт ANSYS Workbench.
3. Модель детали при необходимости дорабатывается и стилизуется во встроенном CAD-пакете DesignModeler.
4. Модель втягивается в расчетный модуль Mechanical. Создается сетка конечных элементов.
5. Конечноэлементная модель (в сущности, вариант 3D-модели) виртуально закрепляется и нагружается. Выбирается тип МКЭ-анализа. В рамках дисциплины

предусмотрены статический, модальный и гармонический анализы.

6. Производится собственно МКЭ-расчет. Анализируются результаты постпроцессирования.

7. При необходимости модель повторно редактируется в DesignModeler и выполняется повторный МКЭ-анализ.

Самым важным обстоятельством в этой цепочке является простота и дружелюбность интерфейсов как SolidWorks, так ANSYS Workbench. Студенты «на лету» осваивают основные правила работы. Все добросовестные обучающиеся выполняют требования дисциплины без принципиальных трудностей.

Ниже представлены характерные примеры в цепочке моделей двойного назначения (CAD/CAE), реализующие концепцию в ходе лабораторных работ.

**Модель 1.** Литой кронштейн (рис. 1) рисуется в 3D студентами дважды — сначала цельным, а потом с внутренней полостью. Обучение является локализованным: именно такие кронштейны удерживают плакаты в коридорах факультета. Размеры кронштейнов снимаются с реальных объектов, нагруженность которых студент может оценить непосредственно.

Сила прикладывается внутри отверстия, в котором устанавливается штанга. МКЭ-расчет иллюстрирует классическую задачу об изгибе консольной балки. Можно увидеть сжатые и растянутые волокна, нейтральный слой. Хорошо ощущается нарастание изгибающего момента при приближении к опоре. Учащийся может в подробностях рассмотреть концентраторы напряжений: 9.7829 МПа и 14.313 МПа.

Сравнивая изгиб цельного и пустотелого кронштейнов, студенты усваивают понятия жесткости и прочности детали. Влияние моментов инерции поперечного сечения кронштейна на перемещение проушины становится очевидным при сопоставлении напряженно-деформированных состояний кронштейнов под действием вертикальных (рис. 1, а) и боковых (рис. 1, б) сил. В ходе МКЭ-расчета студентам становится понятно, почему необходимо увеличивать сечение кронштейна по мере приближения к крепежному фланцу.

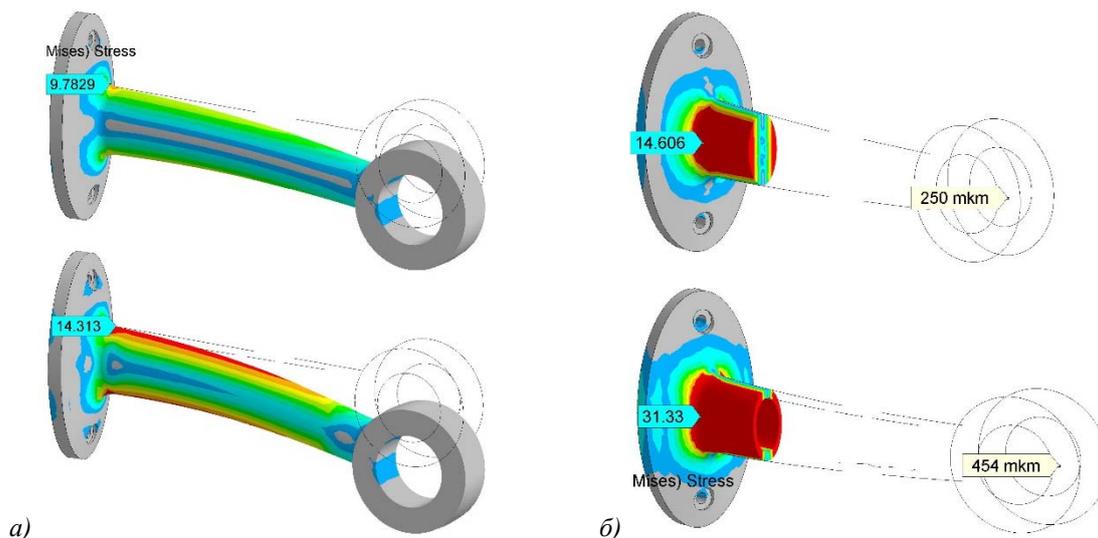


Рис. 1. Цельный и пустотелый алюминиевые кронштейны, статически нагружаемые одинаковыми вертикальными (а) и боковыми (б) силами величиной по 100 Н (цветовая шкала эквивалентных напряжений  $\sigma_{\text{экв}}$  одинакова на всех видах).

**Модель 2.** Гофрированная пластина (рис. 2), передающая вес человека на верхний конец ножки вращающегося стула. В реальности

пластина является стальной штамповкой. Ее размеры вносятся студентами в 3D-модель непосредственно с натурального экземпляра.

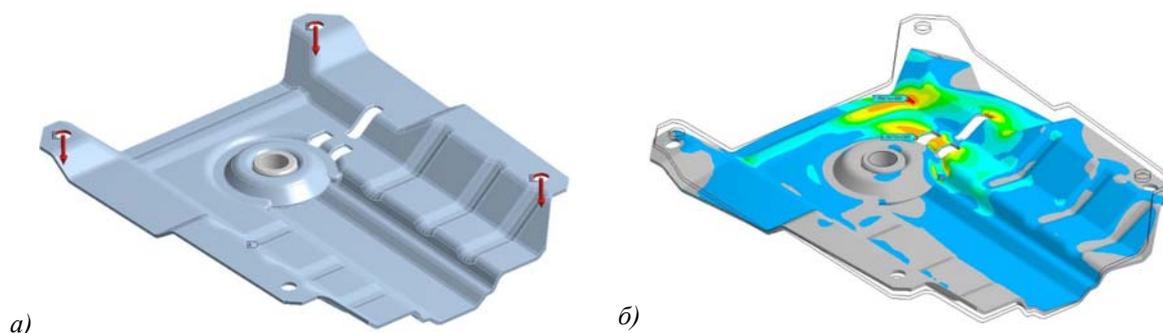


Рис. 2. Трехмерная модель опорной пластины сиденья вращающегося стула (а) и концентрация напряжений в случае смещения сидящего человека (б).

Солид-пластину дополняют центральной втулкой и сварным швом между ними. Пластина имеет три конструктивные прорези, две из которых выходят на границу сварного шва. Такое решение является неудачным с точки зрения усталостной прочности детали, и студенты получают возможность усвоить это. МКЭ-расчет показывает концентрацию напряжений именно на углах прорезей. Кроме того, натуральный экземпляр пластины уже имеет трещину. Она начинается непосредственно на выходе прорези к сварному шву.

В план работы с данной моделью заложено не только изучение отрицательного примера, но рассматривается также выход из этой ситуации. Для этого опорная пластина переделывается в САЕ-пакете, и вдвое увеличивается по высоте поперечной гофры. Переход в САЕ-пакет и расчет позволяют увидеть, что это выравнивает передачу усилий на центральную втулку. В результате в 2–3 раза падает концентрация напряжений в углах прорезей. Таким образом, долговечность опорной пластины возрастает без полной переделки механизма кресла.

**Модель 3.** Сборка из двух солидов, отражающая взаимодействие кранового крюка и звена грузовой цепи (рис. 3). Построение в САД половины звена цепи позволяет изучить вытягивание постоянного сечения по криволинейной траектории. Значительно больших усилий требует рисование солида «Крюк». Студенты создают систему пространственно ориентированных сечений, предварительно выстраивая систему плоскостей и вводя две направляющие линии— только тогда вытягивание «По сечениям» становится возможным.

С точки зрения виртуального нагружения этот пример привлекателен тем, что для крюка существует упрощенный аналитический расчет, показывающий

достижение растягивающего напряжения  $\sigma_1=180$  МПа на внутренней стороне крюка под действием силы 90 кН. С этим прогнозом студентов знакомят до МКЭ-моделирования. После переноса модели в МКЭ-пакет закрепляется верхний торец А (рис. 3, а) и прикладываются две равные силы по 45 кН к торцам полузвена цепи (В и С). В результате расчета (рис. 3, б) в рамках статического анализа обнаруживается очаг растягивающих напряжений (отметка 180.66 МПа). Аналитическая оценка подтверждается численно-математическим моделированием. Это ценное для студентов наблюдение позволяет им лучше понять необходимость обоих подходов и важность сверки результатов.

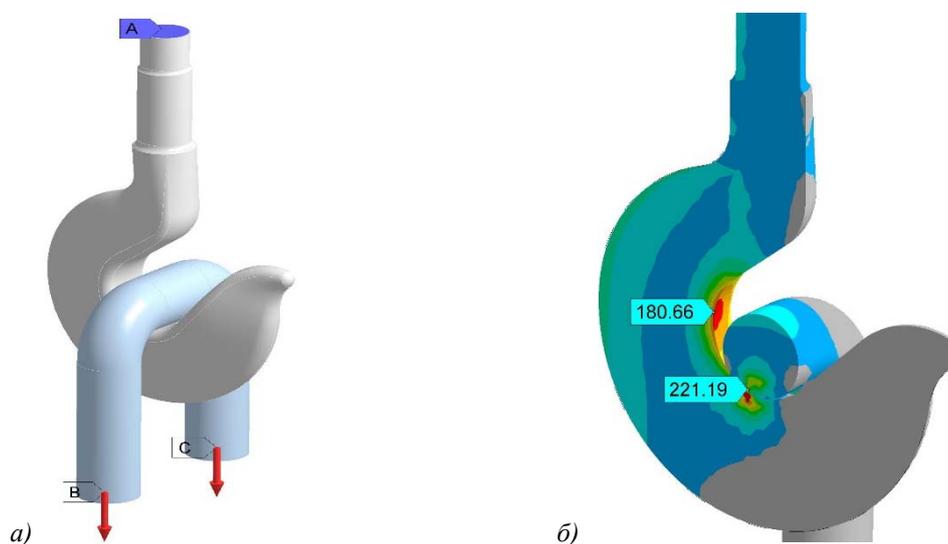


Рис. 3. Нагружение крюка со стороны звена цепи (а) двумя статическими силами по 45 кН и картина эквивалентных напряжений  $\sigma_{эке}$  (МПа) в крюке в плоскости его симметрии (б).

Одновременно выясняется, что МКЭ-расчет расширяет знания об объектах нагружения по сравнению с аналитикой. Обнаруживается ещё один очаг напряжений — на площадке контакта крюка и цепи. Здесь сжимающее контактное напряжение достигает экстремума (отметка 221.19 МПа). Визуализация эффекта контактного сжатия важна для студентов, поскольку они параллельно изучают курс «Детали машин», где применяют формулу Герца-Беляева для

расчета контактной выносливости зубьев зубчатых колес.

**Модель 4.** Сосуд высокого давления (рис. 4). Это довольно сложная сборка инжектора, работающего в составе термопластового литейного автомата. Насос высокого давления (на рисунке не показан) нагнетает расплав пластмассы внутрь сосуда. Пиковое давление может достигать 200 МПа. Через сопло пластмасса выдавливается наружу при отпирании малого отверстия иглой по команде от рукоятки, расположенной на оси.

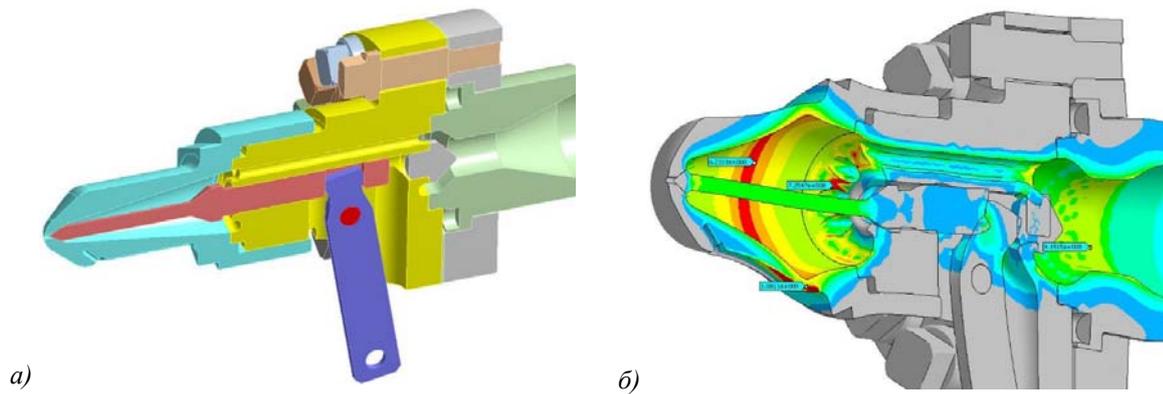


Рис. 4. 3D-модель инжектора (а) для впрыска горячей пластмассы в литейную форму (давление до 200 МПа) и картина деформирования и распределения эквивалентных напряжений в накопительном резервуаре (б).

После переноса модели в САЕ ANSYS все детали оказываются автоматически соединенными контактными парами в статусе *bonded*. Это равносильно склеиванию их идеальным клеем. Для работы механизма некоторым парам нужно установить статус *no separation*. Так обеспечивается идеализированное скольжение без трения. В итоге студенты получают базовые навыки работы с контактами между деталями в машиностроительных сборках.

Нагружение инжектора заключается в статическом приложении следящего давления на внутренние поверхности, контактирующие с жидкой пластмассой (сама пластмасса не моделируется). Инжектор превращается в сосуд высокого давления. Студентам следует найти и проанализировать окружные, осевые и радиальные напряжения, сопоставить их друг с другом.

При поиске наиболее напряженного места в раздуваемом внутренним давлением инжекторе студентов ожидает сюрприз. Оказывается, концентратор напряжений расположен возле продольной наружной канавки, служащей для укладки проводов системы мониторинга. Эта ситуация используется в обучении, чтобы еще раз показать студентам необходимость выявления концентраторов напряжений и их устранения путем правильных конструктивных решений.

**Модель 5.** Античная арка (рис. 5), выполненная методом сухой кладки. Здесь на относительно простом объекте рассматривается сложная конечноэлементная задача контактного класса. Каменные блоки могут с трением перемещаться один относительно другого. Многочисленные контактные пары переводятся студентами вручную в статус *frictional*.

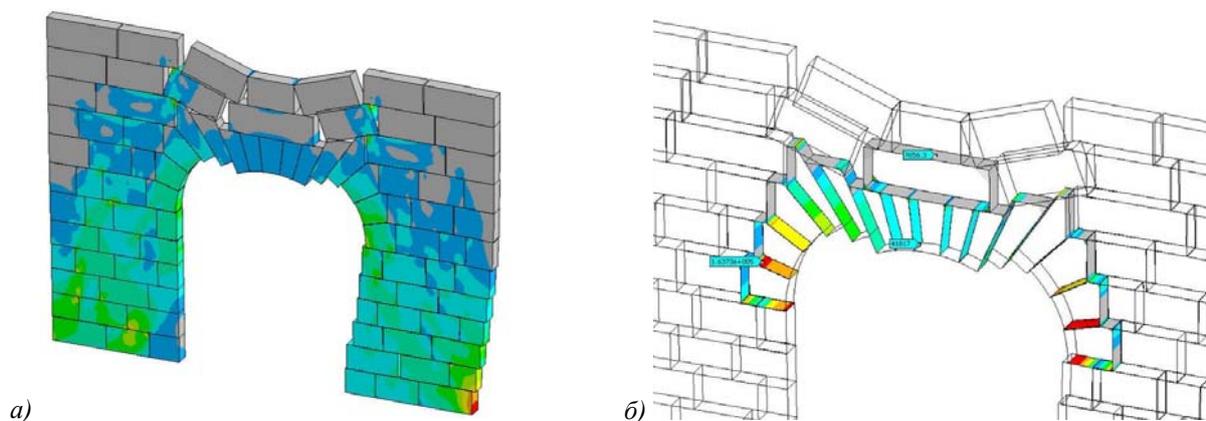


Рис. 5. Контактная задача о сухом трении на примере каменной арки: распределение эквивалентных напряжений при проскальзывании блоков (а), контактные напряжения в месте проседания арки (б).

Построение 3D-модели арки является ещё одной тренировкой на создание сборки. МКЭ-анализ является упражнением на нелинейный расчет, пошаговое нагружение конструкции и применение итерационных процедур. Здесь есть два источника нелинейности — собственно сухое трение и большие перемещения блоков. Студенты должны изучить не только распределение напряжений в блоках, но и ситуацию в стыках — раскрытие стыков, проскальзывание,

а также увидеть картину распределения контактных напряжений.

**Модель 6.** Одноступенчатый конический редуктор (рис. 6). Ценность данной модели заключается в том, что она строится по чертежам из апробированного атласа [5]. Атлас чертежей рекомендуется студентам БНТУ для курсового проектирования по дисциплине «Детали машин». Книгой пользуются многие поколения студентов. Она выдержала ряд переизданий.

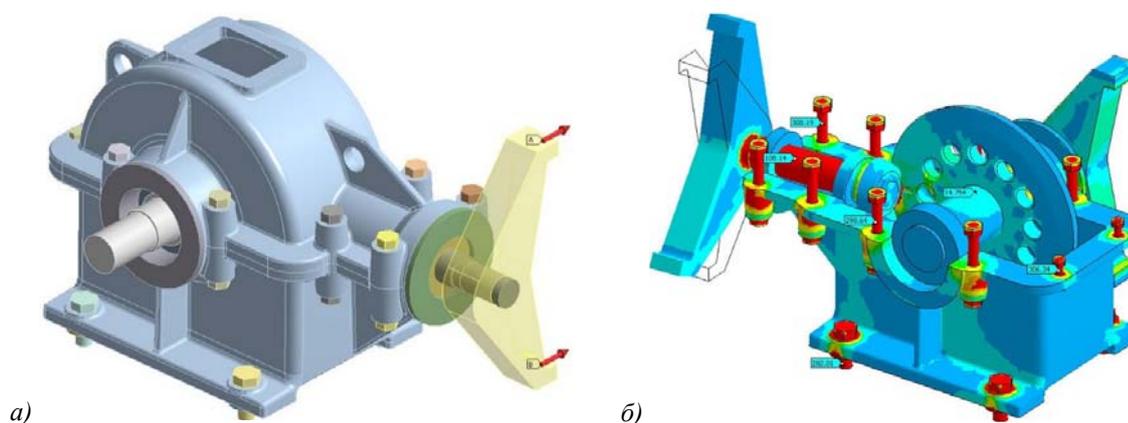


Рис. 6. 3D-модель одноступенчатого конического редуктора (а) и картина напряжений при нагружении входного вала парой сил (б) (со снятой крышкой).

Правый вал редуктора является ведущим (рис. 6, а). С помощью специальной вилки (полупрозрачная деталь — методический объект) к нему приложена пара сил, которая создает крутящий и изгибающий моменты, действующие на вал. Левый, ведомый вал заблокирован по торцу. Колеса и валы внутри редуктора прокручиваются, но на небольшие углы. Это необходимо для имитации вращения.

В данной задаче студенты знакомятся с многошаговым нагружением сложной сборки. На первом шаге средствами МКЭ организуется затяжка болтов. Стыки между корпусом редуктора и крышкой закрываются. На втором шаге редуктор получает рабочую нагрузку, как было описано выше. Стыки между деталями могут частично раскрыться.

В ходе анализа напряженно-деформированного состояния редуктора студент должен обнаружить, что самыми напряженными деталями являются:

- ведущий вал (большие касательные напряжения кручения и нормальные напряжения изгиба);
- болты (высокие растягивающие напряжения вследствие предварительной затяжки).

Дополнительно обучающиеся анализируют перекосы корпуса и крышки редуктора, а также возможности протекания смазки наружу вследствие сквозного раскрытия стыков. Совместно с преподавателем вырабатываются рекомендации по устранению таких неисправностей. Таким образом, используя потенциал трехмерного моделирования и виртуальных испытаний методом конечных элементов, студенты на практике изучают возможности и методы совершенствования конструкции редукторов.

### Заключение

Концепция одновременного обучения студентов 3D-моделированию (CAD) и проведению виртуальных испытаний трехмерных

конструкций (CAE) реализуется на машиностроительном факультете БНТУ с 2011 г. Соответствующая дисциплина «Численные методы механики» показала свою ценность — по отзывам выпускников, предмет является полезным и хорошо запоминающимся. Базовые навыки

CAD/CAE взаимодействия, полученные студентами на III курсе, закрепляются на IV и V курсах. Поэтому такую концепцию следует признать эффективной и рекомендовать к внедрению в учебный процесс технических ВУЗов, готовящих специалистов машиностроительных специальностей.

### **Библиографический список**

1. Kosenko, I.I., Modeling and virtual prototyping. — M: Alfa-M, 2012.
2. Prokhorenko V.P., SolidWorks practical guidance.— M: Benom Press, 2004.
3. Kaplun A.B., ANSYS in the engineer hands.— M: Editorial 2003.
4. Gallager R. Method of eventual elements. Fundamentals.— M: World 1984.
5. Cehnovich L.I., Petrichenko I.P., Atlas of the reducing gears constructions.— K: High School 1990.