

МЕТОДОЛОГИЯ БЫСТРОГО ПОГРУЖЕНИЯ СТУДЕНТА-МЕХАНИКА В ОБЛАСТИ CAD И CAE ОДНОВРЕМЕННО

METHODOLOGY OF MECHANICAL STUDENT QUICK INVOLVEMENT INTO CAD- AND CAE-AREA SIMULTANEOUSLY

Stanisław Downar

Aleksander Jakimowicz

Białoruski Narodowy Uniwersytet Techniczny

Zakład Obrabiarek i Narzędzi do Metali

al. Niezależności 65

220127 Mińsk, Białoruś

e-mail: dovnar@bntu.by

Andrzej Jakubowski

Akademia Morska w Szczecinie

Zakład Mechaniki Technicznej

Wały Chrobrego 1-2

70-500 Szczecin, Polska

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

Abstract. Methodology of quick primary entry into conjugated CAD- and CAE-area is proposed for mechanical students. Three generally known tasks are solved by FEA simulation during three lessons— bracket underweight, curved pipeline pressurizing, cut in welded gas cylinder. Numerous transitions between CAD and CAE are provided. Main technics of 3D-modelling are studied. Loading by force and pressure became known. Students have embraced idea of main stresses triad in each point of model. Everyone can enforce to spot stress concentrators and to find out ways of their alleviation. Methodology is proved during several years. It is feasible just for all students.

Keywords: machine-building, 3D-model, simulation, FEA-analyses, stress concentration, artefact.

Введение

В данной работе, касающейся подготовки инженеров-механиков в сфере машиностроения, речь идет о построении 3D-моделей (область CAD) и виртуальном испытании (область CAE) деталей и сборочных единиц. В работе обсуждается моделирование упругого состояния в расчетах исследуемых объектов на прочность, жесткость и виброустойчивость, а под виртуальными испытаниями понимаются расчеты методом конечных элементов (МКЭ или FEA) [1].

Проблемой обучения студентов механических специальностей является одновременное обучение 3D-построениям и МКЭ-анализу. Это происходит в рамках дисциплины «Численные методы механики», методология которой описана в [2]. Однако студенты подходят к курсу, освоив только проекционное черчение, начертательную геометрию и классическую механику материалов. Поэтому задачей преподавателя является начальное погружение студентов в еще незнакомые им области CAD и CAE, что необходимо сделать одновременно и быстро.

С этой целью авторами разработана *методика трех занятий*, подготавливающих студентов к восприятию полного курса «Численные методы механики». Спецификой построения занятий является режим *неожиданных ситуаций* (НС). В ходе МКЭ-расчетов студент получает не только общие знания, но и сталкивается с неожиданным «поведением» конструкций (с точки зрения обычного опыта). Такие ситуации важны для быстрого освоения специфики виртуальных трехмерных испытаний.

Общие особенности методики трех занятий

1. Письменные методические материалы студентам не выдаются, а преподаватель демонстрирует действия сеансами, между которыми студенты получают лишь устные консультации.
2. Задачи относятся к расчетам в области действия закона Гука.
3. Не акцентируется внимание на материале моделируемого объекта (по умолчанию принимается сталь).
4. Изначально не придается большого значения точности вычислений, сходимости модели, густоте

сетки, не оговаривается также сингулярность в конечно-элементных решениях.

5. Действует режим упрощения и стилизации геометрии моделей.

6. После появления первых результатов МКЭ-анализа преподаватель индивидуально контролирует получение технической анимации, а затем обсуждает со всей группой студентов дальнейшие действия.

7. Связь между пакетами САД и САЕ осуществляется посредством передачи геометрического файла в нейтральном формате Parasolid (двухнаправленные мосты и контуры оптимизации не активируются).

Рассмотрим содержание занятий и приведем необходимые пояснения получаемых результатов.

Занятие 1

Исследование напряженно-деформированного состояния (НДС) кронштейна.

Кронштейн (литая деталь, подвергнутая механической обработке) представлен вертикальной S1 и горизонтальной S2 полками, соединенными треугольным ребром-стенкой W (рис. 1а). В каждой полке по два отверстия (А и С). Все внутренние углы имеют радиусы закруглений (R1 и R2). Сингулярность не возникает.

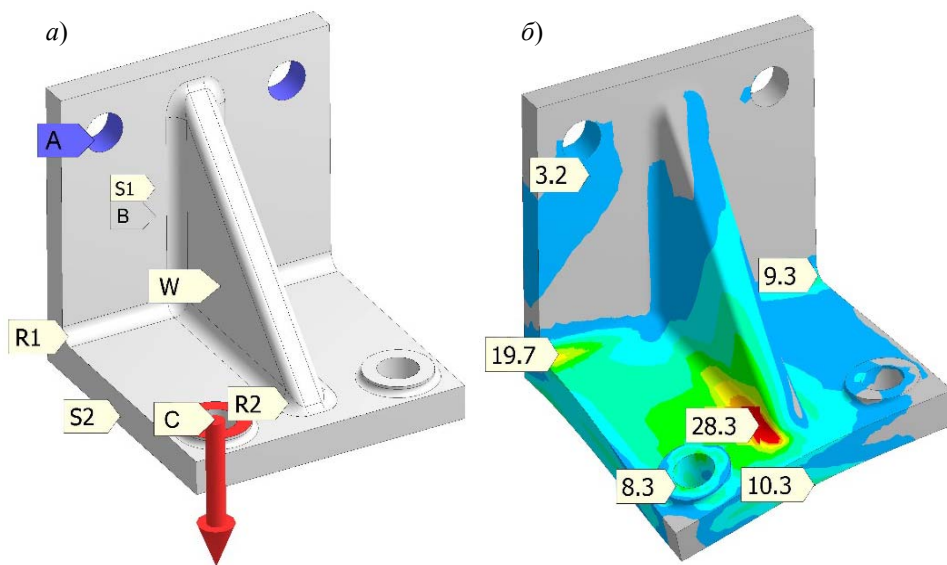


Рис. 1. Модель нагружения кронштейна (а) и картина эквивалентных напряжений в МПа (б): А — отверстия для жесткого крепления кронштейна к вертикальной стене; В — задняя поверхность вертикальной полки кронштейна; С — место приложения статической силы (1000 Н).

Модель создается как последовательность бобышек и вырезов, эскиз которых студент выполняет в соответствующей плоскости. Размеры кронштейна, кроме габаритных (100×100×100 мм), предлагается назначить на своё усмотрение. Задачей является поиск оптимальной формы детали с точки зрения обеспечения ее прочности с учетом необходимой экономии материала.

Кронштейн жестко крепят к вертикальной стене через отверстия А в полке S1 (крепление на рис. 1 не показано) так, что полка к стене прилегает плотно, без трения. Затем кронштейн асимметрично нагружают сосредоточенной силой, имитирующей подве-

шенный груз, через отверстие С в полке S2, под которой свободное пространство.

Картина эквивалентных напряжений (рис. 1б) указывает на мощный концентратор напряжений (28,3 МПа). Неожиданность ситуации НДС заключается в том, что таковым не является ни место крепления, ни место нагружения кронштейна. Таким образом, студент уясняет, что очаги напряжений часто лежат вдали от предполагаемых зон.

МКЭ-решение позволяет наблюдать триады главных напряжений (рис. 2), представляющие собой три взаимно перпендикулярных вектора σ_1 , σ_2 , σ_3 (где $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$), повернутых в каждой точке под собственным углом.

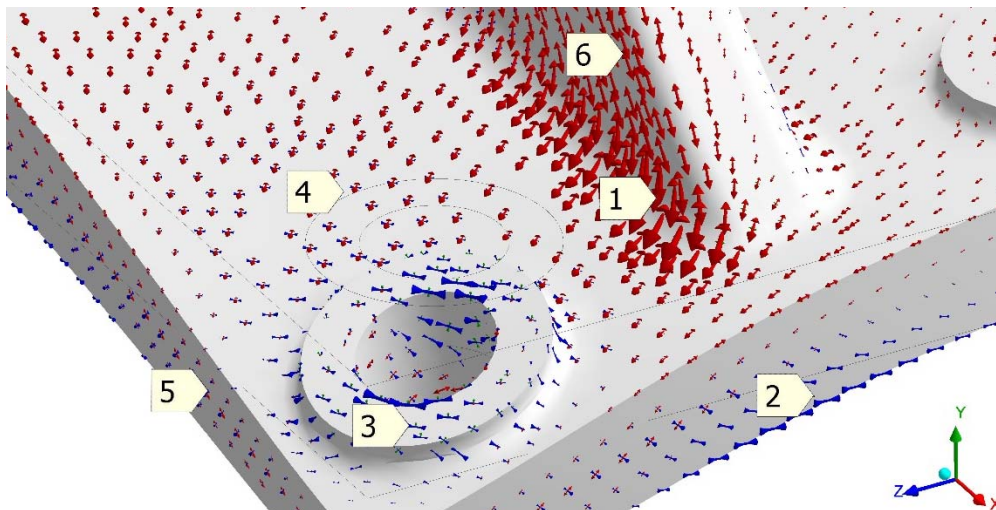


Рис. 2. Триады векторов главных напряжений и типы напряженных состояний.

Асимметрично нагруженный кронштейн является удобным примером с точки зрения наглядности — на одной модели можно одновременно наблюдать несколько различных видов напряженных состояний. Например:

- в концентраторе напряжений (стык ребра и горизонтальной полки — маркер 1) возникает *трехосное растяжение*, где при очень высоком положительном напряжении σ_1 положительными также являются небольшие напряжения σ_2 и σ_3 (здесь следует обратить внимание студентов на то, что объемное растяжение опасно с точки зрения инициации хрупкого разрушения);
- на нижней поверхности горизонтальной полки (маркер 2) создается *одноосное сжатие*, где от нуля отличается только отрицательное напряжение σ_3 ;
- в месте приложения силы (3) имеем *двухосное сжатие*;
- рядом (4 и 5) наблюдается наиболее распространенное в практике состояние растяжения–сжатия,

когда нулевое значение имеет среднее главное напряжение σ_2 ;

- ребро кронштейна (6) подвергается практически *одноосному растяжению*.

Масса кронштейна, изображенного на рис. 1, составляет 1,909 кг. На рис. 3 представлена его модификация с меньшей массой (1,846 кг) после ручной приблизительной оптимизации формы, где горизонтальная полка со стороны А утончена (облегчена) на 7 мм, а со стороны В утолщена (усилена) на 4 мм. В результате немного выросло (до 21,7 МПа) локальное напряжение на стыке полок, но исходная концентрация напряжений снизилась до уровня 22,8 МПа (в 1,24 раза). Здесь студентам необходимо пояснить, что в случае циклического нагружения и кубической кривой усталости это позволяет увеличить долговечность детали в 1,91 раза. С другой стороны, сделанное в ребре модифицированного кронштейна облегчающее отверстие С образует новый концентратор напряжений (22,3 МПа).

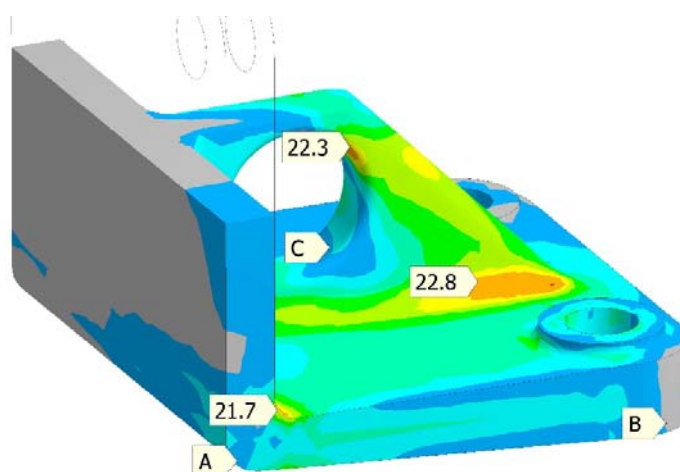


Рис. 3. Распределение эквивалентных напряжений (МПа) в модифицированном кронштейне.

Таким образом, студент видит неожиданную ситуацию НС2, когда деталь имеет три разных концентратора напряжений почти одинакового уровня (~22 МПа), то есть наблюдается в некотором смысле *равнопрочная конструкция*.

Знания и навыки, приобретаемые студентами на данном занятии:

- освоение базовой методики «бобышка–вырез» при 3D-моделировании;
- ознакомление с сеткой конечных элементов;
- виртуальное закрепление модели и ее нагружение сосредоточенной силой;
- визуальное восприятие модели в деформированном состоянии, концентраторов напряжений и триад главных напряжений;
- освоение приемов ручного устранения концентраторов напряжений;
- оптимизация формы и веса моделируемой детали.

Занятие 2

Исследование НДС изогнутого трубопровода на опорах.

Моделируется многоколенная труба А–В, установленная в опорах С и D участками F и G (рис. 4а). Преподавателем задаются внутренний и наружный диаметры сечения трубы, а также вводятся следующие ограничения: обеспечение технологичности конструкции, соответствие стандарту минимальных радиусов гибки трубы, прямые углы гибки, не более двух соседних колен в одной плоскости. Студент вычерчивает пространственную линию, описывающую траекторию трубопровода, и протягивает по ней заданное сечение. Для выполнения этой части задания используется 3D-прием «вытяжка сечения по траектории». Затем отдельными солидами студент создает подушки-опоры, которые накладывает на прямолинейные участки трубы.

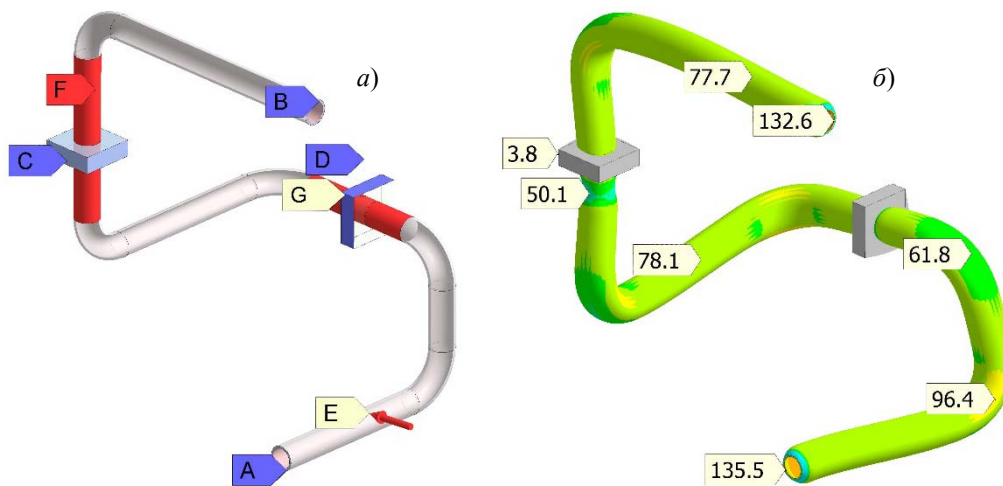


Рис. 4. Конструкция трубопровода (а) и распределение эквивалентных напряжений в МПа по наружной поверхности трубы (б).

После импорта модели в САЕ-пакет между подушкой С и трубой на участке F возникает контактная пара. Аналогичный контакт появляется также между D и G. При этом в ходе МКЭ-расчета можно варьировать между статусами контактов — *bonded* (блокировка) и *no separation* (легкое скольжение без отрыва). Любой из них может быть принят в данной задаче, и не усложнит ее.

Перед виртуальным испытанием конструкции производят фиксацию торцов трубы и подушек-опор (см. рис. 4а). Затем во внутренней поверхности трубопровода (E) создают гидростатическое давление $p=20$ МПа. В результате картина распределения возникающих эквивалентных напряжений (рис. 4б) отображает неожиданную ситуацию НС3, которая заключается в том, что очагами напряжений (132,6 и 135,5 МПа) оказываются торцы трубы. Так студент знакомится с эффектом локального возмущения напряжений и выясняет, что это обычно связано с упрощениями в процессе моделирования, так как в

реальных конструкциях изменение напряжений имеет «гладкий» характер. Напряжения, возникающие на наружной поверхности трубы, на свободных от опор прямолинейных участках имеют среднее значение (77,7 и 78,1 МПа) между напряжениями на изгибах (61,8 и 96,4 МПа). При этом роль усилителя трубы играют подушки-опоры — маркер (50,1 МПа) указывает на разгруженный участок (перетяжку). Именно подушка, являющаяся слабо нагруженным элементом конструкции (3,8 МПа), препятствует развитию деформации трубы.

Неожиданность ситуации НС4 заключается в полной картине распределения напряжений вследствие недооценки НДС трубы, которая связана с анализом результатов, полученных только лишь для наружной поверхности, тогда как максимальные главные напряжения σ_1 на внутренней поверхности оказываются примерно в полтора раза выше (рис. 5а). Концентраторами напряжений, где возможно пластическое разрушение трубопровода, являются

изгибы трубы (135,9 МПа, 138 МПа и 142,4 МПа). Студент, кроме того, уясняет, что концентраторы

напряжений возникают обычно на поверхности, а не внутри материала.

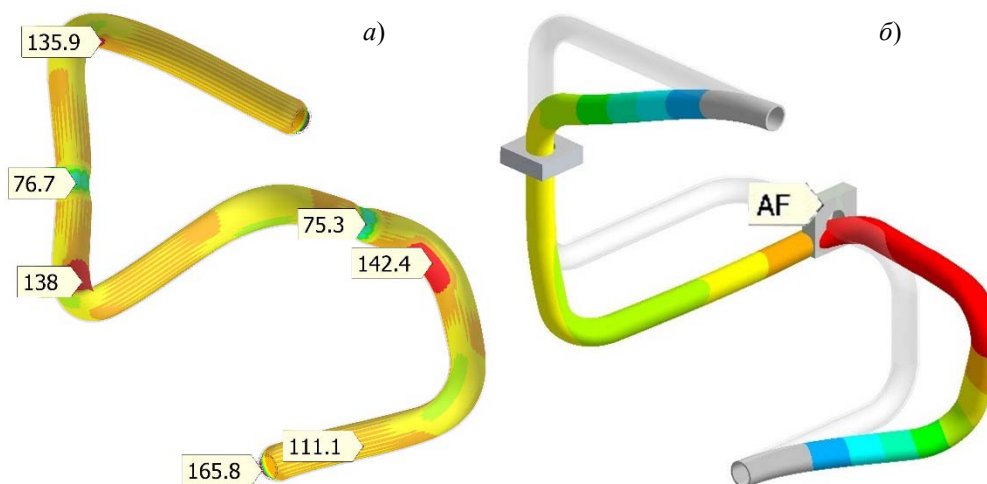


Рис. 5. Распределение максимальных главных напряжений σ_1 в МПа по внутренней поверхности трубы (а) и форма резонансных колебаний на частоте 409 Гц (б).

Очередной неожиданной ситуацией НС5 является полосчатый рисунок (см. рис. 5а), хотя для циклического изменения напряжений в данном случае нет объективных причин. Так студент выясняет, что к колебаниям цветовых границ приводят погрешности МКЭ как численно-математического метода.

Факультативно на занятии можно выполнить анализ резонансных колебаний трубопровода, присвоив контактному парам статус *no separation*. Тогда будет наблюдаться скольжение трубы в отверстиях подушек (рис. 5б). Здесь студент сталкивается еще с одной неожиданной ситуацией НС6 — артефактом AF, который отображает искаженную картину прохождения трубы сквозь подушку. Студенту следует объяснить, что отдельные участки детали могут смещаться и приближаться к другим, не сместившимся или малоподвижным деталям, вследствие чего возникает непредполагаемое пересечение тел.

Знания и навыки, приобретаемые студентами на данном занятии:

- освоение 3D-приема «вытяжка по пространственной траектории»;
- построение модели, состоящей из нескольких солюдов;
- отработка статусов контактных пар;
- создание в модели конструкции виртуального гидростатического давления;
- выявление скрытых концентраторов напряжений;
- моделирование резонансных колебаний;
- восприятие артефактов МКЭ.

Занятие 3

Исследование НДС баллона с газом под внутренним давлением.

Бытовой баллон со сжатым внутри газом как осесимметричное тело моделируется путем построения профиля баллона и вращения профиля вокруг его оси (рис. 6). Согласно отраслевому стандарту днища баллона представляют собой полусферы, а обечайка — цилиндрическую оболочку диаметром 300 мм. Толщина стенки обечайки и днищ равна 3 мм. Остальные размеры студент принимает самостоятельно, учась изображать полную модель, ее половину (рис. 6а), четверть (рис. 6б), сектор модели с любым углом. Далее в обечайку врезается трубопровод ВС, а место врезки (В) усиливается (утолщается). Так, впоследствии студент познакомится с грубой конструктивной ошибкой, ведущей к резкому снижению прочности баллона.

Затем конструкция крепится за горловину А баллона и торец С трубопровода. Здесь студенту следует объяснить, что в случае представления для исследования разрезанной модели следует дополнительно ввести граничные условия, исключающие все возможные перемещения ненагруженной модели перпендикулярно плоскостям разреза.

Со стороны внутренней поверхности баллона и в трубопроводе создается гидростатическое давление (D на рис. 6б), равное согласно отраслевому стандарту 1,6 МПа. Предполагается, что баллон выполнен из стали, для которой предел текучести $\sigma_T=240$ МПа, тогда при статическом одноразовом нагружении и запасе прочности 1,5 допустимое напряжение равно $\sigma=160$ МПа.

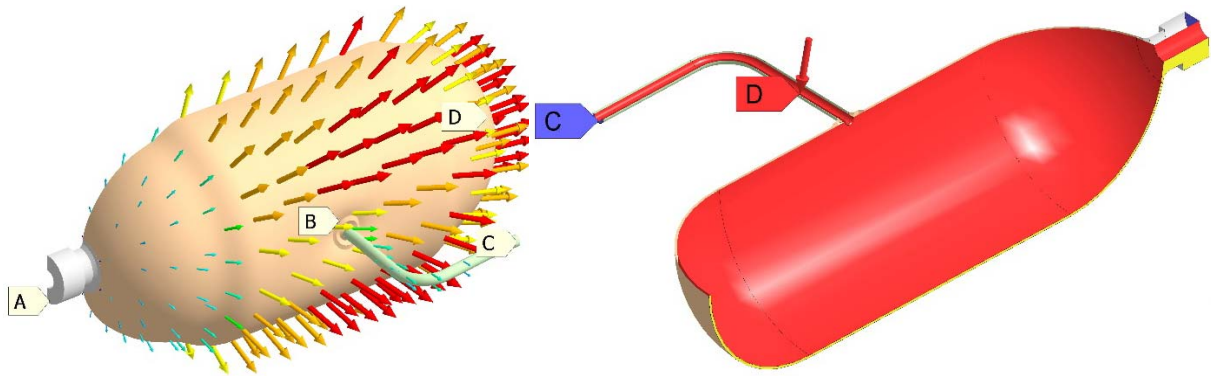


Рис. 6. Половина (а) и четверть (б) модели баллона с врезанным трубопроводом, находящегося под действием давления сжатого газа.

Картина деформированного состояния нагруженного баллона, где стрелками обозначены направления перемещений (см. рис. 6а), выявляет неожиданную ситуацию (НС7), связанную с тем, что размеры баллона увеличиваются в продольном направлении больше, чем в поперечном.

Картина напряженного состояния баллона (рис. 7а) демонстрирует следующие неожиданные ситуации:

1) концентратор напряжений в месте врезки трубопровода (149,9 МПа) оказывается не на наружной поверхности баллона, а на внутренней, и усиление

конструкции снаружи (область В на рис. 6а) практически бесполезно (НС8);

2) даже после врезки трубопровода в обечайку при высоких напряжениях в указанном концентраторе (149,9 МПа σ) сохраняется работоспособность баллона (НС9);

3) несмотря на тонкую стенку (лишь 3 мм), наибольшие напряжения в обечайке вдали от концентратора (70,5 МПа), возникающие при нормальной эксплуатации баллона, обеспечивают вполне безопасный уровень прочности (запас выше 3), и баллон остается прочной конструкцией (НС10).

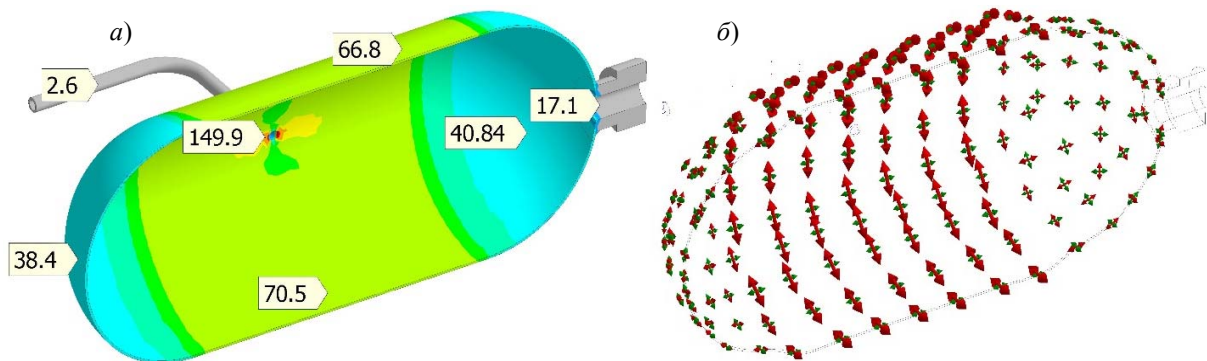


Рис. 7. Напряженное состояние баллона, находящегося под действием внутреннего давления — распределение эквивалентных напряжений в МПа (а) и триады главных напряжений (б).

Триады главных напряжений на внутренней поверхности баллона (рис. 7б), особенно хорошо просматриваемые на обечайке, позволяют установить, что максимальным σ_1 является тангенциальное (окружное) напряжение, а среднему σ_2 соответствует осевое напряжение. Неожиданной ситуацией (НС11) является то, что минимальное напряжение σ_3 ,

направленное радиально и равное давлению газа (1,6 МПа), почти незаметно на фоне напряжений σ_1 и σ_2 (на два порядка ниже).

Обычно встречающаяся в практике недогрузка многих участков конструкции (см. рис. 7а) в сочетании с перегрузкой немногих участков также является неожиданной ситуацией (НС12): напряжения в

концентраторе (149,9 МПа) более, чем в 2 раза выше напряжений в обечайке (66,8 МПа и 70,5 МПа), которые в свою очередь почти вдвое больше, чем в днищах (38,4 МПа и 40,84 МПа), тогда как горловина является слабо нагруженной частью баллона (17,1 МПа), а врезанный толстостенный трубопровод почти «не ощущает» давления газа (2,6 МПа).

Знания и навыки, приобретаемые студентами на данном занятии:

- освоение операции вращения эскиза при создании осесимметричной модели;
- визуальное восприятие неполной, разрезанной модели и введение граничных условий для обеспечения симметрии конструкции;
- моделирование умышленного концентратора напряжений (врезка трубопровода в обечайку);
- выявление тангенциальных, осевых и радиальных напряжений в триадах главных напряжений;
- освоение приемов локального усиления конструкции в местах концентрации напряжений.

Выводы

В результате проведения *трех занятий* студент получает представление о том, как строить 3D-модели осесимметричных, профильных, массивных объектов, а также усваивает понятие солида и осваивает технику работы с несколькими солидами и контактными парами.

В области МКЭ студент получает навыки исследования НДС модели и усовершенствования ее конструкции, опираясь на следующие требования:

- повысить прочность конструкции, понижая напряжения в концентраторах;
- повысить жесткость конструкции, особенно в подвижных опорах;
- снизить вес конструкции.

Таким образом, студент приобретает следующие знания и навыки:

1) в САД-области:

- построение 3D-моделей средней сложности;
- управление формой и размерами модели, добавляя или убирая отдельные фрагменты;
- работа с интерфейсом САД и анализ 3D-модели;
- экспортирование модели в САЕ-пакет;

2) в САЕ-области:

- построение сетки конечных элементов и управление сгущениями КЭ;
- закрепление и нагружение модели, проведение МКЭ-расчета;
- анализ НДС объекта и выделение концентраторов напряжений;
- принятие мер по снижению напряжений в концентраторах, повышению жесткости конструкции, уменьшению ее веса.

Таким образом, *методика трех занятий*, которая происходит, во многом, в игровой форме, является эффективной и апробированной технологией быстрого погружения студентов в области САД и САЕ моделирования, поскольку учебная практика последних лет показывает, что буквально все студенты справляются с учебным материалом дисциплины «Численные методы механики».

Библиография

1. Zenkevich, O., Morgan, K., Konechnyye elementy i approksimatsiya: per. s angl. Mir, Moskva, 1986.
2. Downar, S., Jakimowicz, A., Jakubowski, Cz., Jakubowski, A., Conception of simultaneous teaching the students of direction "Machine design" to three-dimensional modeling and virtual testing by FEM-analysis, *General and professional education*, 1, 2016, pp. 26–32.