

Визуализация энергетической эффективности использования материала в твердом деформируемом теле

М. В. Чугунов¹, И. Н. Полунина²

Национальный исследовательский Мордовский государственный университет;
МГУ им. Н. П. Огарева

¹ ORCID: 0000-0001-5318-5684, m.v.chugunov@mail.ru

² ORCID: 0000-0002-1093-8401, my_pk@mail.ru

Аннотация

Среди систем научной визуализации особое место занимают постпроцессорные средства CAE (Computer Aided Engineering), особенностью которых является их интегрированность с системами CAD (Computer Aided Design), востребованными в повседневной деятельности инженера-конструктора. При этом актуальной является задача расширения и углубления штатной функциональности постпроцессоров CAE, как исследовательского инструмента, позволяющего выполнить анализ проектного решения по различным критериям.

В данной работе представлено Add-in приложение SolidWorks (Simulation), реализующее визуализацию состояния и поведения деформируемого твердого тела в терминах энергетической эффективности использования материала. Рассмотрены критерии эффективности использования материала.

Представлено решение в среде MS VisualStudio C++/C# для SolidWorks Simulation на основе API (Application Program Interface) SolidWorks и COM (Component Object Model), расширяющее и дополняющее штатный функционал SolidWorks в части визуализации указанных критериев и параметров напряженно-деформированного состояния деформируемого твердого тела.

Ключевые слова: постпроцессоры CAE-систем, энергетический критерий эффективности использования материала, SolidWorks Simulation, напряженно-деформированное состояние.

1. Введение

Как для разработчика, так и для пользователя, постпроцессорные средства CAE характеризуются свойствами, аналогичными тем, которыми обладают современные системы научной визуализации универсального назначения. В данном контексте следует отметить несколько уровней и направлений развития постпроцессорных средств CAE.

1. Киберфизические мультиплатформенные системы на базе технологий IoT, предоставляющие средства для высокоуровневой адаптации к источнику данных от решателя (процессора) [1,2];
2. Web-сервисы, обеспечивающие постпроцессинг для метода конечных элементов. Предполагается, что пользователь использует собственный конечноэлементный процессор, а постпроцессор использует данные пользователя и реализуется в облаке на базе OpenGL [3].
3. Расширение функций постпроцессора на базе технологий дополненной и виртуальной реальности [4,5,6].
4. Разработка приложений для CAE, предназначенных для решения частных задач визуализации в среде конкретной CAE-системы [7-9].

В данной работе рассматривается решение частной задачи визуализации для CAD/CAE SolidWorks (Simulation).

Наиболее близкой к данной статье, является работа [9], в которой решена задача анализа и визуализации освещенности трехмерных объектов. Задача решается Add-in приложением к SolidWorks (Simulation). Этот подход, как в статье [9], так и в данной работе отличается очевидным преимуществом: используются штатные функции CAD/CAE моделирования, в том числе алгоритмы дискретизации и другие функции конечноэлементного процессинга, инструменты управления базами данных, процедурами экспорта-импорта, а также пользовательский интерфейс.

В связи с тем, что до сих пор не существует единой теории прочности, вновь разрабатываются теории и подходы, основанные на своих собственных критериях. В инженерной практике актуальной является проблема множественного выбора критериев прочности, качественного сопоставления результатов анализа, в том числе и визуального.

В частности, В.П. Малковым был предложен энергетический критерий эффективности использования материала [10, 11], который может быть использован как для качественной, так и количественной оценки эффективности проектного решения с точки зрения прочности. Визуальное представление проекта в указанных терминах, соответствующих разным критериям прочности, может быть использовано и при решении оптимизационных задач в строгой постановке, и в вариантном проектировании.

Для определения энергетического критерия эффективности использования материала применяется ряд известных соотношений механики деформируемого твердого тела [10, 12, 13]. В частности, удельная потенциальная энергия упругой деформации изотропного деформируемого твердого тела определяется в виде

$$U_0 = \frac{1}{2} (\sigma_x \varepsilon_x + \sigma_y \varepsilon_y + \sigma_z \varepsilon_z + \tau_{xy} \gamma_{xy} + \tau_{xz} \gamma_{xz} + \tau_{yz} \gamma_{yz}) = \frac{1}{2} (\sigma_1 \varepsilon_1 + \sigma_2 \varepsilon_2 + \sigma_3 \varepsilon_3) = \frac{1}{2E} [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\mu(\sigma_1 \sigma_2 + \sigma_1 \sigma_3 + \sigma_2 \sigma_3)],$$

где $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$ и $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{xz}, \gamma_{yz}$ – компоненты тензоров напряжений и деформаций соответственно; $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные напряжения, $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ – главные деформации, E – модуль Юнга, μ – коэффициент Пуассона.

На основе имеющихся экспериментальных диаграмм при растяжении, сжатии и чистом сдвиге можно судить о предельных состояниях материала в окрестности опасных точек, в которых наблюдаются максимальные значения того или иного численного критерия. Тогда допускаемые (предельные, т.е. при коэффициенте запаса, равном единице) удельные энергоемкости можно соответственно определить для случаев растяжения, сжатия и сдвига следующим образом как:

$$[U_0]_+ = \int_0^{\sigma_L^+} \varepsilon(\sigma) d\sigma, [U_0]_- = \int_0^{\sigma_L^-} \varepsilon(\sigma) d\sigma, [U_0]_0 = \int_0^{\tau_L^0} \gamma(\tau) d\tau.$$

В этих формулах $\sigma_L^+, \sigma_L^-, \tau_L^0$ – предельные для материала значения напряжений соответственно при растяжении, сжатии и сдвиге.

Для материалов, работающих в линейно-упругой стадии эти формулы приобретают вид:

$$[U_0]_+ = \frac{(\sigma_L^+)^2}{2E}, [U_0]_- = \frac{(\sigma_L^-)^2}{2E}, [U_0]_0 = \frac{(\tau_L^0)^2}{2G}.$$

В свою очередь, вид напряженного состояния может быть охарактеризован с помощью параметра Лоде-Надаи [10, 12]:

$$\chi = 2 \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} - 1, -1 < \chi < +1,$$

таким образом, имеем при $\chi = -1$ – растяжение, при $\chi = +1$ – сжатие, при $\chi = 0$ – сдвиг. Для смешанных напряженных состояний допустимая удельная энергоемкость может быть определена по формуле [10]:

$$[U_0] = \min([U_0]_+, [U_0]_-, [U_0]_0).$$

Тогда локальный (удельный) энергетический критерий [10] может быть определен как

$$\eta_0 = \frac{U_0}{[U_0]}$$

Для определения глобального энергетического критерия η [10] необходимо выполнить интегрирование по объему тела:

$$\eta = \frac{\int_{V_0} \eta_0 dV}{V_0} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{FE}} \eta_0^{(i)} V_i}{V_0},$$

где V_0 – объем тела. Здесь же приведена формула для определения η в случае конечно-элементной дискретизации, V_i – объем i -того конечного элемента, N_{FE} – количество конечных элементов.

Таким образом, для качественной и количественной оценки проектного решения представляют интерес визуализация распределения по объему деформируемого тела параметров U_0 , χ , η_0 , а также значение интегрального параметра η .

2. Программная реализация

В терминологии SolidWorks среди множества терминов – дополнение, приложение, плагин – в русскоязычном варианте предпочтение отдается термину "Дополнение" или "Добавление" (англ. Add-in). Add-in модуль создан как DLL библиотека и является COM-сервером, т.е. SolidWorks в данном случае является приложением, инициирующим выполнение функций нашего модуля Add-in (SwAddin). При этом модуль регистрируется в системе служебной программой RegAsm.exe.

SolidWorks при запуске проверяет реестр на дополнения (приложения к SolidWorks), создает объект, связанный с дополнением, разыскивает объект SwAddin. Add-In модуль вызывает функцию ISwAddin:: ConnectToSW для соединения с SolidWorks.

При отключении SolidWorks вызывает ISwAddin::DisconnectFromSW, обеспечивая приложению возможность для очистки.

Кроме того, функция ISwAddin:: ConnectToSW возвращает указатель на объект приложения высшего уровня ISldWorks.

На практике, основная функциональность дополнения, как правило, реализуется отдельным DLL модулем, максимально отделенным от интерфейсов и загружаемым Add-in дополнением. На рисунке 1 приведено решение (solution) для рассматриваемой задачи в среде MS VisualStudio C++/C#.

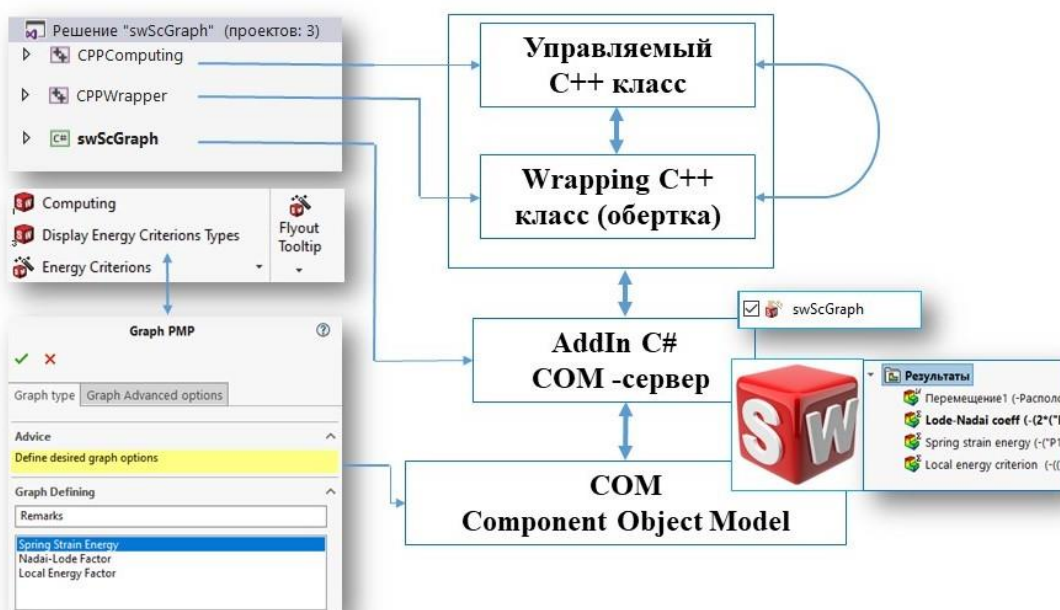


Рис. 1. Решение (solution) в среде MS VisualStudio C++/C#

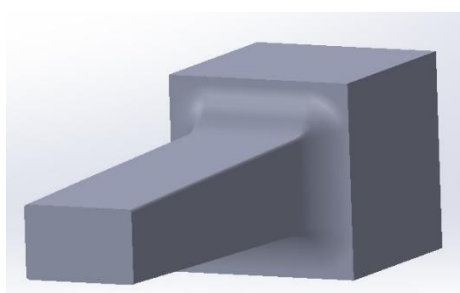
Выбранная структура решения обусловлена довольно типичной ситуацией, которая связана с необходимостью модульного представления решения на разных языках программирования. В данном случае решение содержит в себе три проекта.

1. Первый предназначен для реализации вычислительных процедур, включает в себя специальный C++ класс `CPPComputing`. Связано это с тем, что с использованием C++ уже создан большой объем программного обеспечения (в том числе и авторами), который может быть включен в данное решение или при его дальнейшем развитии.
2. Проект C# `swScGraph`, реализующий COM-сервер SolidWorks и соответствующий интерфейс.
3. Wrapping – класс (обертка) `CPPWrapper` обеспечивает для `swScGraph` доступ к методам класса `CPPComputing`.

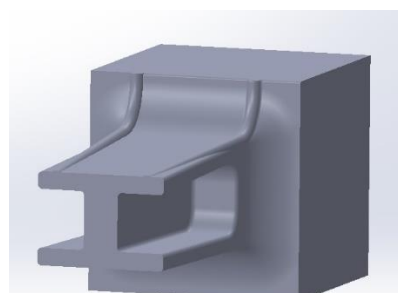
При этом API SolidWorks обеспечивает доступ к параметрам конечноэлементной сетки и к результатам решения, необходимым для численной реализации приведенных выше формул.

3. Результаты

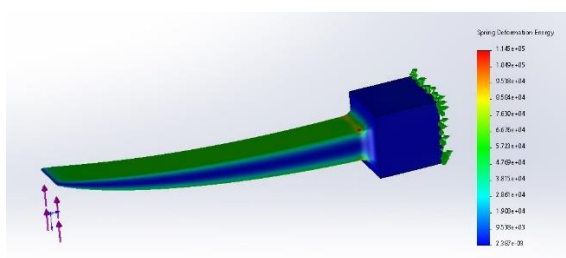
Представленная в статье методика проиллюстрирована на примере равнонапряженной балки с двумя типами поперечного сечения: прямоугольного (рисунок 2 A_1) и близкого к двутавровому (рисунок 2 A_2).



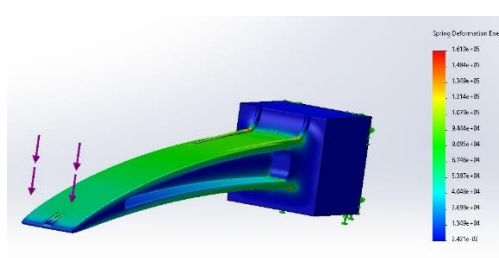
A_1



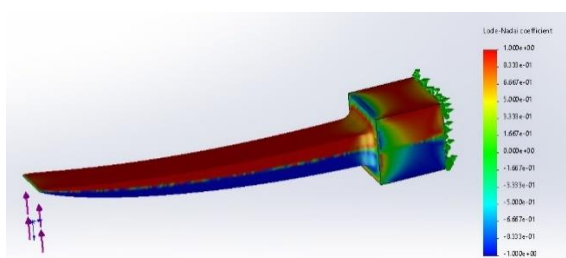
A_2



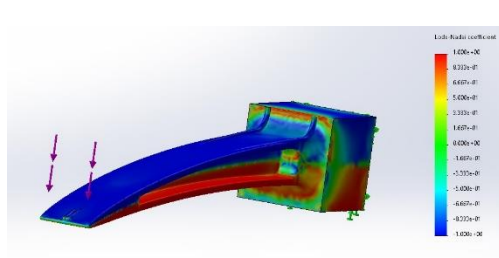
B_1



B_2



B_1



B_2

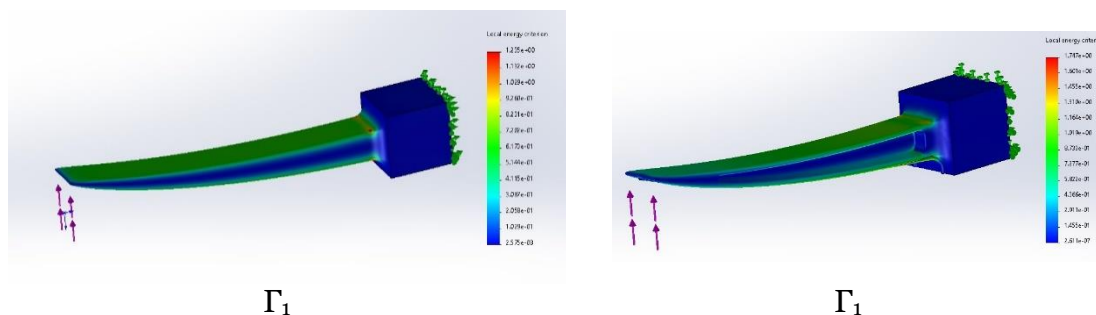


Рис. 2. Результаты решения задачи для равнонапряженной балки.
 А – поперечное сечение. Б – удельная потенциальная энергия упругой деформации. В – параметр Лоде-Надаи. Г – локальный энергетический критерий. Индекс 1 соответствует балке с прямоугольным сечением, индекс 2 – балке с двутавровым сечением

Кроме того, двутавровая балка усилена продольными ребрами жесткости, которые наряду со скруглениями введены в твердотельную модель с целью снижения концентрации напряжений, возможной сингулярности и краевых эффектов [12, 13]. Далее на рисунке 2 Б₁–2 Г₁ и 2 Б₂–2Г₂ представлены скалярные поля в виде карт (эпюр). При этом рисунок 2 Б₁- 2 Б₂ представляет собой результат работы штатного функционала SolidWorks Simulation, а рисунки 2 В₁–Г₁ и 2 В₂–Г₂ построены приложением, разработанным авторами. Следует отметить, что в последнем случае сохраняются все штатные функциональности SolidWorks Simulation в части визуализации полученных скалярных полей: масштабирование, зондирование, назначение шкалы (легенды), цветовой палитры и т.д.

Из рисунков 2 В₁ - 2 В₂ видно, что для усиленной двутавровой балки параметр Лоде-Надаи имеет более высокие градиенты по сравнению с прямоугольной, что говорит о более сложном сочетании видов напряженного состояния в объеме тела. Для удельной потенциальной энергии упругой деформации и локального энергетического критерия наблюдается картина противоположного толка, т.е. градиенты этих полей ниже (рисунки 2 Б₁ - 2 Б₂ и 2 Г₁ - 2 Г₂ соответственно). При этом глобальный энергетический критерий для балки двутаврового сечения увеличился до значения $\eta = 0,62$ от $\eta = 0,32$, определенного для прямоугольного сечения.

Важно отметить, что для графических объектов, созданных приложением, вся штатная функциональность рендеринга SolidWorks Simulation сохраняется и в случае их анимирования. Так, на рисунке 3 показано в виде анимации изменение локального энергетического критерия при возрастании параметра внешней нагрузки от нуля до конечной величины (рисунк 3). При этом, как и во всех подобных случаях статического нагружения, масштабный коэффициент для деформаций задается пользователем из соображений наглядности результирующего деформированного состояния.

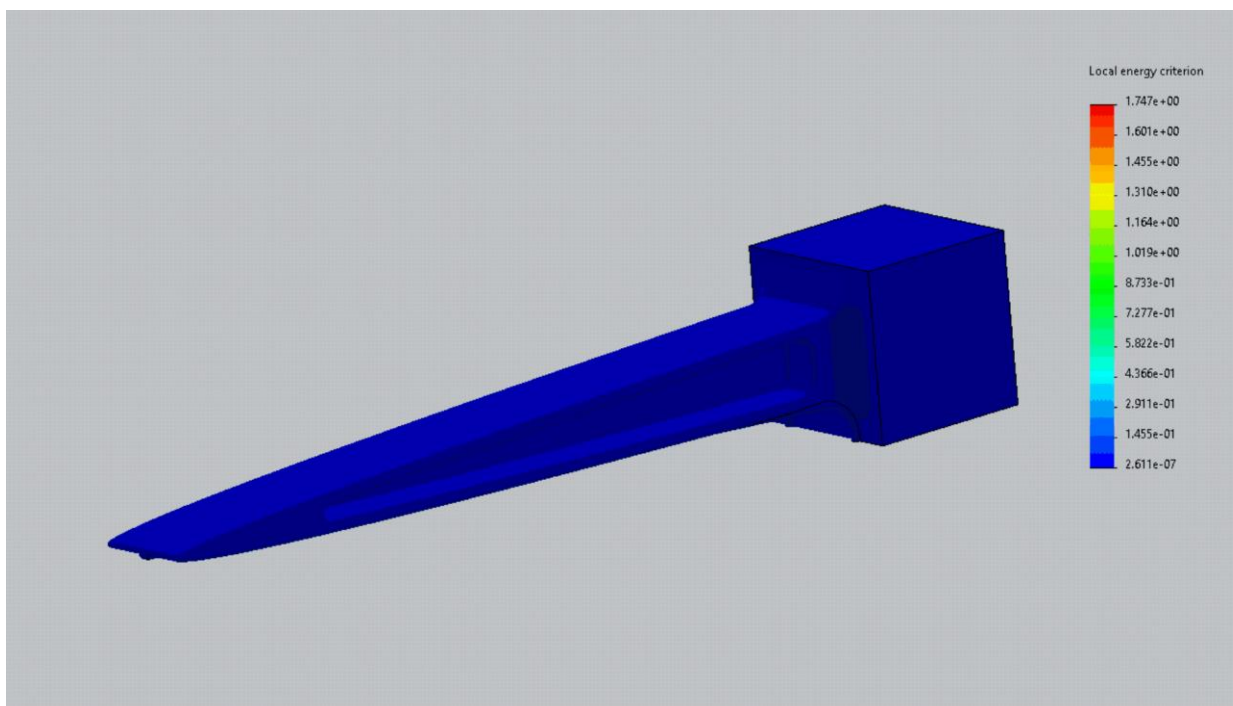


Рис. 3. Анимация для изменения локального энергетического критерия.

4. Заключение

В статье представлено программное обеспечение, расширяющее штатную функциональность SolidWorks Simulation в части визуализации скалярных полей напряженно-деформированного состояния при статическом нагружении. В качестве тестовых рассмотрены известные в инженерной практике задачи равнопрочного (равнонапряжённого) проектирования.

Приложение готово для практического применения и не имеет ограничений для качественной и количественной оценки эффективности использования материала в реальных силовых конструкциях на основе рассматриваемого критерия.

В качестве перспектив работы следует указать распространение функциональности приложения на задачи динамики, например, для анализа удара твердых тел. В этом случае программное обеспечение требует доработки и в рассматриваемом контексте сводится к визуализации (анимации) на конечном временном интервале не только скалярных, но и векторных полей, связанных с потоками энергии и процессами её перехода из одних видов в другие.

Авторы готовы предоставить разработанное ими программное обеспечение в исходных текстах всем, кто желает использовать его для решения своих исследовательских задач.

Список литературы

1. Ryabinin, K.V. Human-Oriented IoT-Based Interfaces for Multimodal Visual Analytics Systems/ K.V. Ryabinin, K.I. Belousov, S.I. Chuprina, N.L. Zelyanskaya// Scientific Visualization. – 2019. – Vol. 11, № 7. – P. 53-65. – DOI: 10.26583/sv.11.4.05
2. Рябинин, К. В. Унифицированное решение задач адаптации систем научной визуализации к сторонним решателям / К. В. Рябинин, С. И. Чуприна // Программирование. – 2016. – Том 42, № 6. – С. 23-34.
3. Wei-ChuWeng. Short Communication Web-based post-processing visualization system for finite element analysis/ Wei-ChuWeng. //Advances in Engineering Software. –2011. – Vol. 42, № 6. – p. 398-407. – <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2011.03.003>

4. Huang, J.M. Real-time finite element structural analysis in augmented reality/ J.M. Huang, S.K. Ong, A.Y.C. Nee// *Advances in Engineering Software*. – 2015.– Vol. 87, September. – p. 43-56.–<https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2015.04.014>.
5. Huang, J.M. Visualization and interaction of finite element analysis in augmented reality/ J.M. Huang, S.K. Ong, A.Y.C. Nee// *Computer-Aided Design*. – 2017. – Vol. 84, March. – p. 1-14. – <https://doi.org/10.1016/j.cad.2016.10.004>
6. Barbieri, L. Innovative integration techniques between virtual reality systems and CAx tools/ L. Barbieri, F. Bruno, F. Caruso, M. Muzzupappa// *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* – 2008. – Vol. 38, № 11. – p. 1085-1097. – <https://doi.org/10.1007/s00170-007-1160-3>
7. Димитриенко, Ю.И. Визуализация тензорных полей на основе геометрического представления тензоров/ Ю.И. Димитриенко, Е.А. Губарева, С.В. Сборщиков// *Научная визуализация*. – 2018. – Том 10, № 2. – С. 95-111. – DOI: 10.26583/sv.10.2.08
8. Лобанов, В.А. Визуализация САЕ-решений частных задач ледового судоходства. Посадка и ходкость ледокола/ В.А. Лобанов// *Научная визуализация*. – 2020. – Том 12, № 1. – С. 48 -60. – DOI: [10.26583/sv.12.1.04](https://doi.org/10.26583/sv.12.1.04)
9. Buriol, T. M. CAD and CAE integration through scientific visualization techniques for illumination design/ T. M. Buriol, S. Scheer// *Tsinghua Science and Technology*.–2008.– Vol. 13, № S1.– p. 26-33.– <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6072953>
10. Малков, В.П. Энергоемкость механических систем / В. П. Малков; Нижегород. гос. ун-т им. Н. И. Лобачевского. – Н. Новгород : Изд-во Нижегород. ун-та, 1995. 257 с. – - ISBN 5-230-04344
11. Концепция критерия энергоемкости в анализе и оптимизации стержневых систем/ В.А. Бараненко, А.М. Сопильняк// *Вісник Дн-вск: ПГАСА: сб. научных трудов*. – Днепропетровск, 2008.– Вып. 6-7. – С 18-21.
12. Работнов, Ю. Н. Механика деформируемого твердого тела/ Ю. Н. Работнов.– М.: Наука, 1988. – 711 с. – ISBN 5-02-013812-6
13. Бате, К. Численные методы анализа и метод конечных элементов / К. Бате, Е. Вилсон. М.: Стройиздат, 1982.448 с. – ISBN 978-5-458-28582-7

Visualization of energy efficiency of using a material in a deformable solid

M.V. Chugunov¹, I.N. Polunina²

National Research Mordovia State University; MRSU

¹ ORCID: 0000-0001-5318-5684, m.v.chugunov@mail.ru

² ORCID: 0000-0002-1093-8401, my_pk@mail.ru

Abstract

Among scientific visualization systems, CAE (Computer Aided Engineering) post-processing tools hold a special place, the feature of which is their integration with CAD (Computer Aided Design) systems, which are essential in the daily activities of a design engineer. At the same time, the task of expanding and deepening the standard functionality of CAE postprocessors as a research tool that allows performing analysis of the design solution against various criteria is relevant.

This paper presents the SolidWorks (Simulation) add-in, which visualizes the state and behavior of a deformable solid in terms of the energy efficiency of using the material. The criteria for the efficiency of using the material are considered.

A solution in MS VisualStudio C ++/C # environment for SolidWorks Simulation based on API (Application Program Interface) SolidWorks and COM (Component Object Model) is presented, which expands and complements the standard SolidWorks functionality in terms of visualization of the specified criteria and parameters of the stress-strain state of a deformable solid.

Keywords: CAE systems postprocessors, energy criterion of material use efficiency, SolidWorks Simulation, stress-strain state.

References

1. Ryabinin, K.V. Human-Oriented IoT-Based Interfaces for Multimodal Visual Analytics Systems/ K.V. Ryabinin, K.I. Belousov, S.I. Chuprina, N.L. Zelyanskaya// Scientific Visualization. – 2019. – Vol. 11, № 7. – P. 53-65. – DOI: 10.26583/sv.11.4.05
2. Ryabinin, K.V. A unified approach to adapt scientific visualization systems to third-party solvers/ K.V. Ryabinin, S.I. Chuprina// Program Comput Soft. – 2016. – Vol. 42. – P. 347–355. – <https://doi.org/10.1134/S0361768816060049>.
3. Wei-ChuWeng. Short Communication Web-based post-processing visualization system for finite element analysis/ Wei-ChuWeng. //Advances in Engineering Software. –2011. – Vol. 42, № 6. – p. 398-407. –<https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2011.03.003>
4. Huang, J.M. Real-time finite element structural analysis in augmented reality/ J.M. Huang, S.K. Ong, A.Y.C. Nee// Advances in Engineering Software. – 2015.– Vol. 87, September. – p. 43-56.–<https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2015.04.014>.
5. Huang, J.M. Visualization and interaction of finite element analysis in augmented reality/ J.M. Huang, S.K. Ong, A.Y.C. Nee// Computer-Aided Design. – 2017. – Vol. 84, March. – p. 1-14. – <https://doi.org/10.1016/j.cad.2016.10.004>.
6. Barbieri, L. Innovative integration techniques between virtual reality systems and CAX tools/ L. Barbieri, F. Bruno, F. Caruso, M. Muzzupappa// Int. J. Adv. Manuf. Technol. – 2008. – Vol. 38, № 11. – p. 1085-1097. – <https://doi.org/10.1007/s00170-007-1160-3>

7. Dimitrienko, Yu.I. Visualization of tensor fields based on geometric representation of tensors/ Yu.I. Dimitrienko, E.A. Gubareva, S.V. Sborshikov // Scientific visualization. – 2018. – Vol. 10, № 2. – p. 95 -111. – [DOI: 10.26583/sv.10.2.08](https://doi.org/10.26583/sv.10.2.08)
8. Lobanov, V.A. Visualization of CAE solutions for private ice shipping problems. Icebreaker Landing and Walking/ V.A. Lobanov// Scientific Visualization. – 2020. – Vol. 12, № 1. – p. 48 -60. – DOI: 10.26583/sv.12.1.04
9. Buriol, T. M. CAD and CAE integration through scientific visualization techniques for illumination design/ T. M. Buriol, S. Scheer// Tsinghua Science and Technology.–2008.– Vol. 13, № S1.– p. 26-33.– <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6072953>
10. Malkov, V.P. Energy intensity of mechanical systems: monograph/V.P. Malkov. – N. Novgorod: Publishing House of NSU, 1995. – 258 p. – ISBN 5-230-04344
11. Concept of energy intensity criterion in analysis and optimization of rod systems / V.A. Baranenko., A.M. Sopilnyak// Visnik Dnepropetrovsk PGSA: Col. scientific works. – Dnepropetrovsk, 2008. – Issue 6-7. – p. 18-21.
12. Rabotnov, Yu.N. Solid Mechanics /Yu.N. Rabotnov. – M.: Nauka, 1988. – 712 p. – ISBN 5-02-013812-6
13. Bathe, K. J. Numerical methods in finite element analysis/ K. J. Bathe, E. Wilson. – Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1976. – 528 p.