Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сетевое научное издание
ISSN 1994-0448

Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2014. № 9. С. 216–226.

DOI: 10.7463/0914.0726307

Представлена в редакцию: 01.08.2014
Исправлена: 01.09.2014

УДК 004.4+539.3

Анализ и проектирование несущих элементов конструкций подвижного состава

Чугунов М.В.[1,*], Осыка В.В.[1], Кудаев С.П.[1], Кузьмичёв Н.Д.[1], Клёмин В.Н.[1]

[*] m.v.chugunov@mail.ru

[1] Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева, г.Саранск, Россия

В работе решается задача равнопрочного проектирования конструкций. Разработано программное обеспечение, встроенное в SolidWorks в качестве AddIn-приложения, использующего и дополняющего функционал SolidWorks в указанной части на базе API и COM-технологии. Построена твердотельная модель конструкции несущей рамы вагона, а также 3D-спецификация средствами 3Dvia Composer, которая включена в статью в виде gif-анимации и avi-ролика. В работе приведены результаты анализа напряжённо-деформированного состояния конструкции и равнопрочного проектирования. Показано, что программное обеспечение может применяться для решения задач рационального проектирования в конструкторской практике.

Ключевые слова: САПР, равнопрочность, метод конечных элементов, оптимизация, AddIn-приложения, API, COM-технологии, несущие конструкции подвижного состава

Введение

Важнейшим средством совершенствования работы железнодорожного транспорта является повышение технического уровня подвижного состава, создание и внедрение новых высокоэффективных конструкций вагонов.

Основным несущим элементом конструкции вагона является рама, воспринимающая вертикальные, тяговые, тормозные, инерционные силы на тележки (оси) и на тяговые устройства. Элементами главной несущей рамы являются следующие: хребтовая балка (1), боковые продольные балки (2), основные несущие поперечные балки (3), шкворневые балки (4) (рис.1).

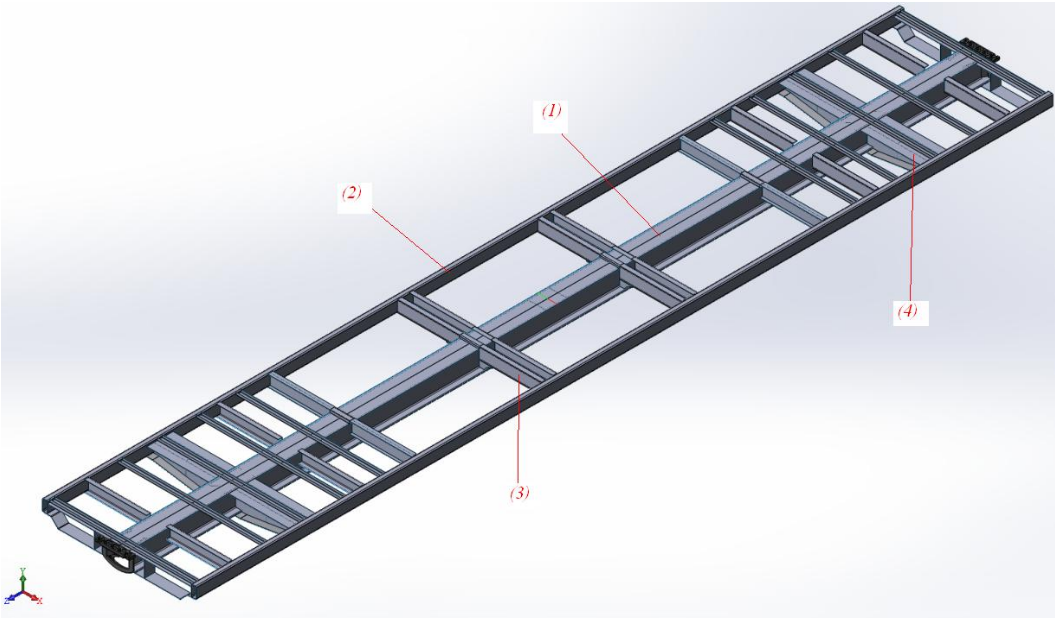


Рис. 1. Основные элементы несущей рамы.

В целом, конструкция рамы включает в себя множество деталей как стандартного, так и нестандартного типа (рис.2).

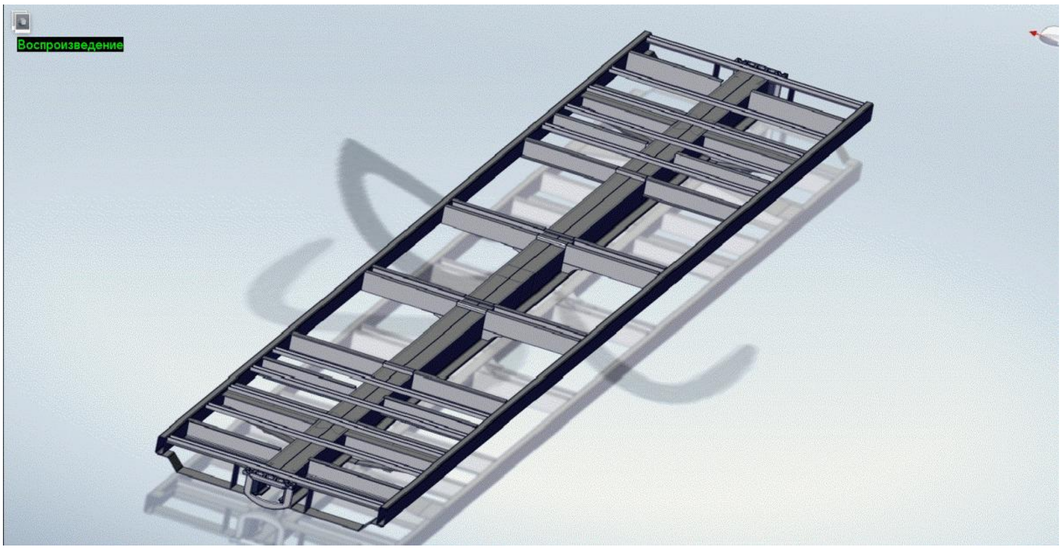


Рис. 2. Конструкция несущей рамы..

Процесс проектирования рамы сводится к поиску проектного решения, удовлетворяющего ряду противоречащих друг другу требований, касающихся: прочности и жесткости (с одной стороны), металлоемкости и технологичности (с другой стороны).

Математически рассматриваемая проблема сводится к решению задачи оптимизации. Известно два основных подхода к решению задач данного класса: первый представляет собой подход, основанный на методах нелинейного математического программирования (НМП). НМП позволяет получить проект минимальной массы, удовлетворяющий при этом ограничениям, наложенным на напряженно-деформированное состояние конструкции [1].

Второй подход представляет собой различные варианты равнопрочного проектирования, применяемые, как правило, для тонкостенных конструкций. Для постановки и реализации оптимального и равнопрочного проектирования существенное значение имеет используемый метод анализа состояния конструкции при фиксированном наборе значений управляемых (варьируемых) параметров (прямой расчёт). Если в качестве такового используется метод конечных элементов, то условие равнопрочности (равнонапряжённости) считается достигнутым, если в каждом конечном элементе (КЭ) величина максимального эквивалентного напряжения «равна» с заданной точностью допускаемой (или предельной) величине. Такие проекты принято называть условно равнопрочными, реализуются они за счёт варьирования толщин конечных элементов оболочечного или пластинчатого типа. Недостатком условно равнопрочных проектов является то, что они не предусматривают возможность даже малого изменения (увеличения) внешних нагрузок, поскольку это изменение влечёт за собой полную потерю несущей способности конструкции в целом [1].

Подходом к равнопрочному проектированию, которому указанный недостаток свойственен не в столь однозначной форме является дискретно равнопрочное проектирование. В этом случае в качестве управляемых параметров выбираются толщины тонкостенных элементов относительно больших размеров (подконструкций) [1]. Условие равнопрочности достигается тогда, когда максимальные значения напряжений в подконструкциях становятся равными предельной величине, или удовлетворяются некоторые изначально наложенные условия сходимости итерационного процесса. В случае приложения неучтённых нагрузок относительно малой величины полная потеря несущей способности такой конструкции, как правило, не угрожает.

В теории оптимального проектирования доказано, что проекты минимального веса и равнопрочные совпадают только для статически определимых систем. Результаты оптимального и равнопрочного проектирования, реализованные в отношении несущих конструкций различного типа, до сих пор представляют как теоретический, так и практический интерес [2, 3].

При этом следует отметить два основных обстоятельства: 1) проекты минимальной массы являются более эффективными как с точки зрения материалоёмкости, так и с точки зрения несущей способности оптимальной конструкции; 2) методы равнопрочного проектирования гораздо более экономичны в вычислительном отношении. Особенно явным образом данный факт проявляет себя в процессе проектирования сложных конструкций высокой размерности, для которых трудоёмкость задачи зачастую ставит под сомнение возможность получение результата.

1. Цель и методы исследования

Целью данной работы является анализ прочности и жёсткости несущей рамы комбинированного вагона, предназначенного для перевозки глинозема и отливок, полученных из него (т.е. с двумя вариантами нагружения), а также разработка и реализация методов равнопрочного проектирования, встроенных в SolidWorks и SolidWoirks Simulation, что позволит решать задачи снижения материалоёмкости в рамках одного конструкторско-исследовательского проекта.

Первый этап решения задачи состоит в формировании концептуальной модели конструкции. Использовать исходную 3D модель напрямую для создания конечноэлементной модели, включающей в себя лишь объёмные КЭ, не представляется возможным в виду высокой размерности такой задачи. С другой стороны, модель, включающая в себя стержневые (балочные) КЭ, хотя и является экономичной, но не позволяет детально определить все концентраторы напряжений. Оптимальным с точки зрения точности и экономичности является вариант комбинированной модели, включающей в себя объёмные и пластинчатые (оболочечные) элементы.

Поскольку 3D-модель является ветвящейся и многосвязной, целесообразно построить сшитые срединные поверхности для тех тонкостенных элементов, которые предполагается рассматривать как пластины и оболочки. На рис. 3 приведена конечноэлементная модель для части конструкции, иллюстрирующей собой данный подход.

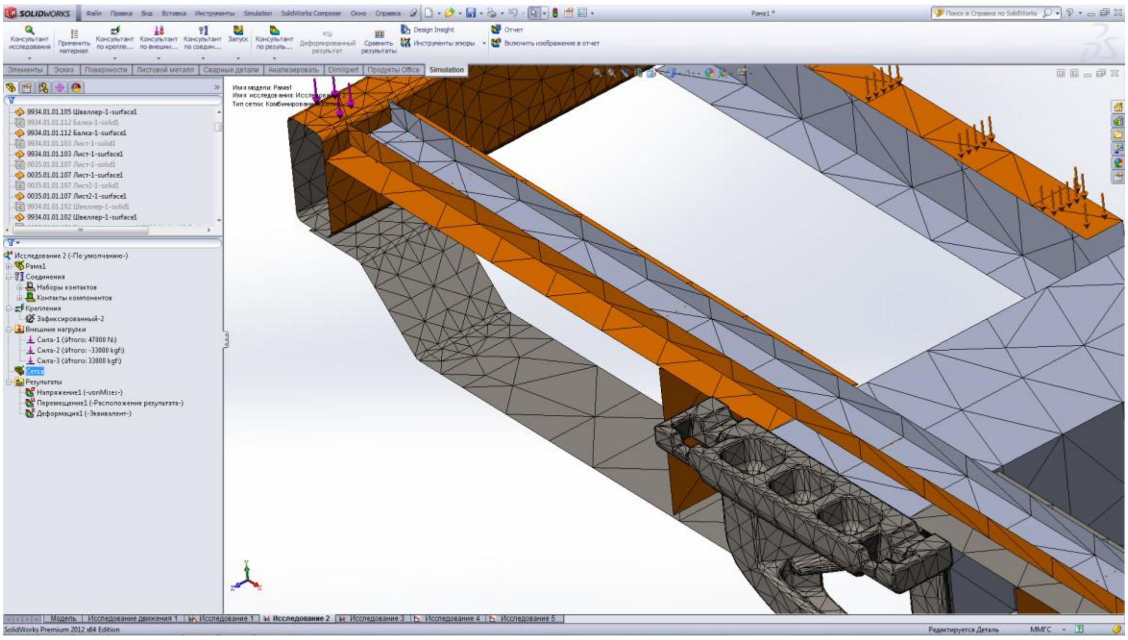
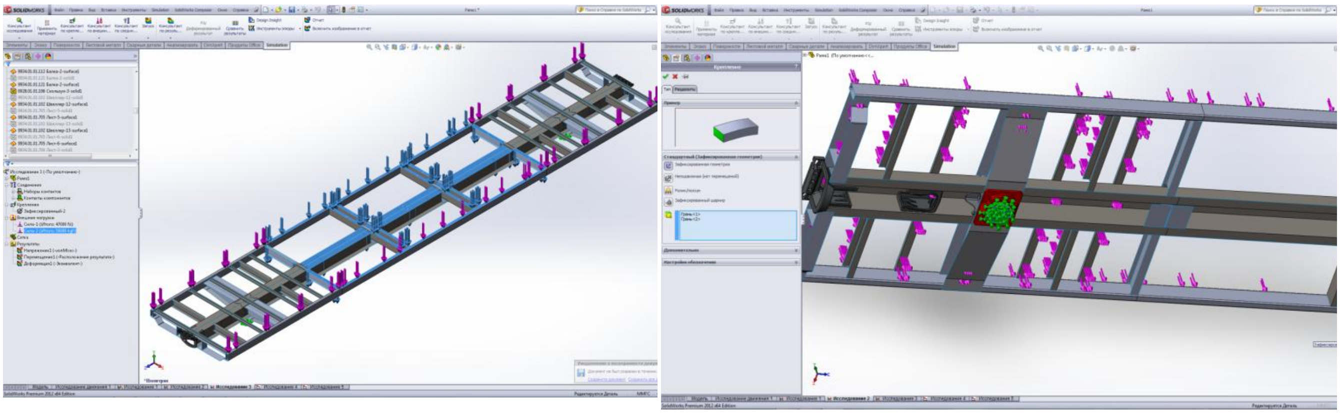


Рис. 3. Фрагмент конечноэлементной модели

На рис. 4 показаны граничные условия. По внешним воздействиям (рис.4 (а)): общим для всех исследований будет вес вагона, равный 47000 Н. Значения сил для варианта с загрузкой боковых отсеков, принимается равным 33000 КгС (векторное представление красного цвета, вариант 1), а для варианта с загрузкой центрального отсека – 50000 КгС. (векторное представление синего цвета, вариант 2). Граничные условия по перемещениям представляют собой жёсткую заделку в области подпятника (рис.4 (б)).

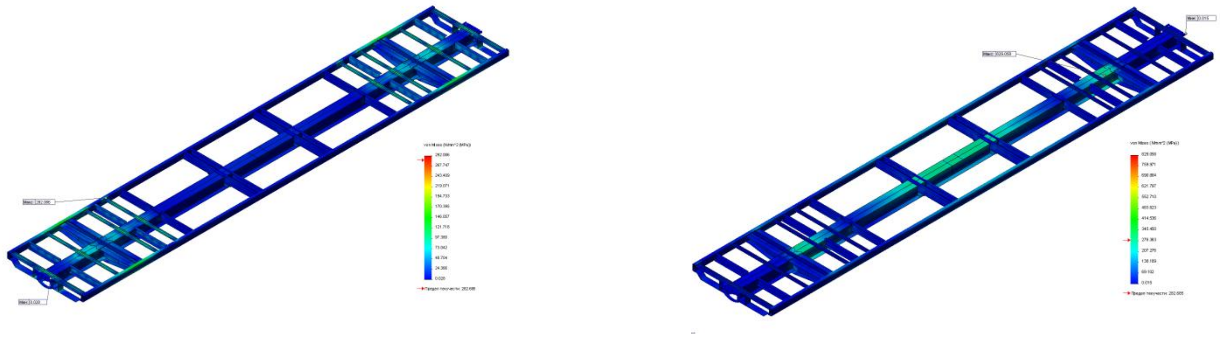


(а) (б)

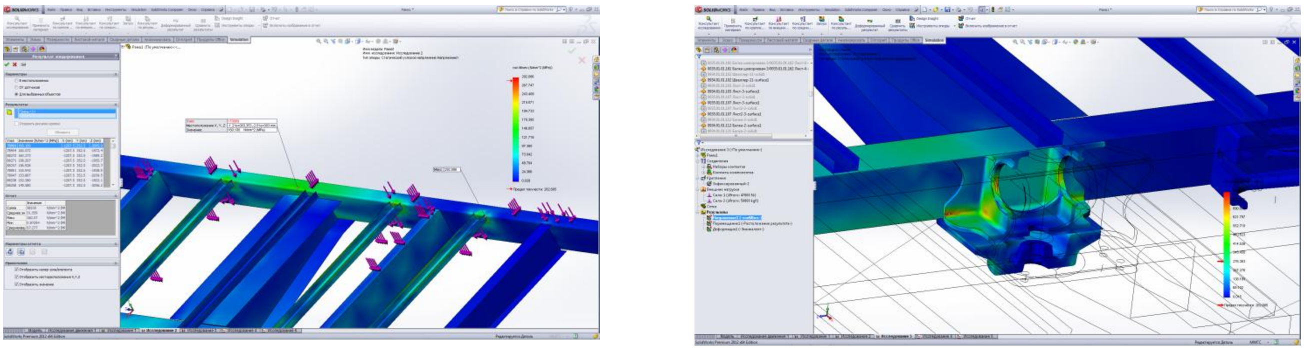
Рис. 4. Граничные условия для задачи. (а) – по силам, (б) – по перемещениям

2. Результаты анализа напряжённо-деформированного состояния

На рис. 5 приведены результаты анализа напряженно-деформированного состояния конструкции для первого (рис. 5 (а)) и второго (рис. 5 (б)) вариантов нагружения. Там же показаны области концентрации напряжений: для первого варианта (рис. 5 (в)) и для второго варианта (рис. 5 (г)). Для второго варианта максимальное напряжение превышает предел текучести, однако концентрация напряжений носит явно выраженный локальный характер.



(а) (б)



(в) Максимальное напряжения по Мизесу 161 МПа (г) Максимальное напряжения по Мизесу829 МПа

Рис. 5. Результаты анализа напряжённо-деформированного состояния в напряжениях по Мизесу.

3. Алгоритм и программная реализация дискретно равнопрочного проектирования

Дискретно равнопрочное проектирование реализуется итерационным алгоритмом, в основу которого положена следующая гипотеза: локальное изменение толщин тонкостенных элементов приводит к локальному изменению напряжённого состояния. В нашем случае в соответствии с [1] имеем:

$$x_{i+1}^{(j)} = x_i^{(j)}\left(1+\gamma\frac{\sigma_T-\sigma_{max}^{(i,j)}}{\sigma_T}\right),\quad \delta_{i+1}^{j}=\left|\frac{x_{i+1}^{(j)}-x_i^{(j)}}{x_i^{(j)}}\right|. \qquad (1)$$

Здесь $x_i^{(j)}$ – неизменная в пределах j-той подконструкции толщина на i-той итерации, т.е. толщина подконструкции рассматривается как управляемый параметр, $\sigma_{max}^{(i,j)}$ - максимальное напряжение по Мизесу в j-той подконструкции на i-той операции, σ_T – предел текучести (в решаемой задаче – константа), γ - параметр сходимости итерационного процесса, как правило, $\gamma = 0{,}25 \div 0{,}5$ и назначается тем ниже, чем выше градиенты напряжений по управляемым параметрам.

В качестве критерия останова итерационного процесса используется условие

$$max_j\ \delta_{i+1}^{j} < \varepsilon,\ \ \varepsilon – \text{малая величина} \qquad (2)$$

SolidWorks Simulation не реализует алгоритмы равнопрочного проектирования, и ранее разработанный нами оптимизационный модуль Optimum.dll [4] был дополнен соответствующим функционалом (рис. 6).

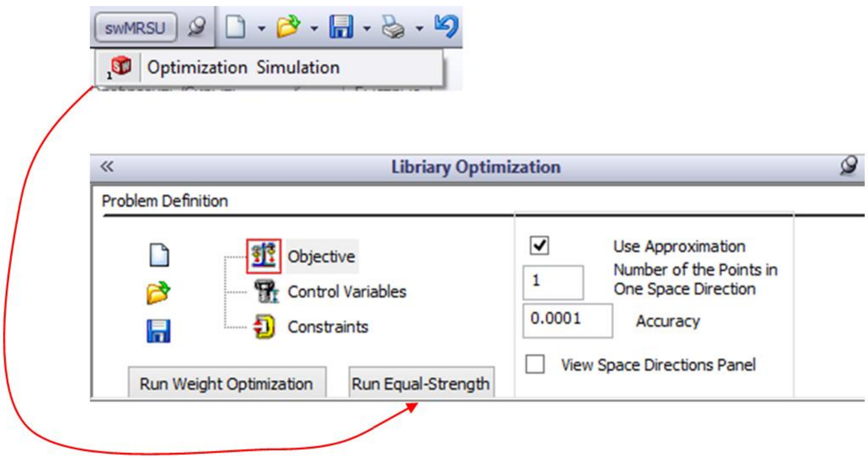


Рис. 6. Фрагмент пользовательского интерфейса, обеспечивающего равнопрочное проектирование из SolidWorks. Кнопка Run Equal-Strength

Взаимодействие Optimum.dll с SolidWorks обеспечивается через COM-интерфейс, созданный с этой целью AddIn-приложением. Загрузка AddIn-модуля осуществляется через пункт меню SolidWorks. Структура программного обеспечения подробно изложена в [4] и в данной работе не изменялась. Особенностями его функционирования по сравнению с [4] является лишь то, что управляемые параметры автоматически связывают свои значения с толщинами элементов, представленными в модели как оболочки, а значения напряжений $\sigma_{max}^{(i,j)}$ на каждой j-той итерации и для каждой i-той оболочки снимаются датчиками. В этих условиях постановка задачи равнопрочности, в отличие от задачи НМП, не требует задания никаких дополнительных исходных данных, кроме параметра сходимости γ.

Одним из достоинств использованного в данной работе объектно-ориентированного подхода [4] является то, что концептуальная, программная и алгоритмическая модели рассматриваемой задачи объединены, по существу, в единое целое. Тем не менее, алгоритмическая составляющая такой интегрированной модели заслуживает к себе особого внимания, поскольку дает наглядное представление о функционировании программы в реальном времени. Блок-схема алгоритма приведена на рис. 7.

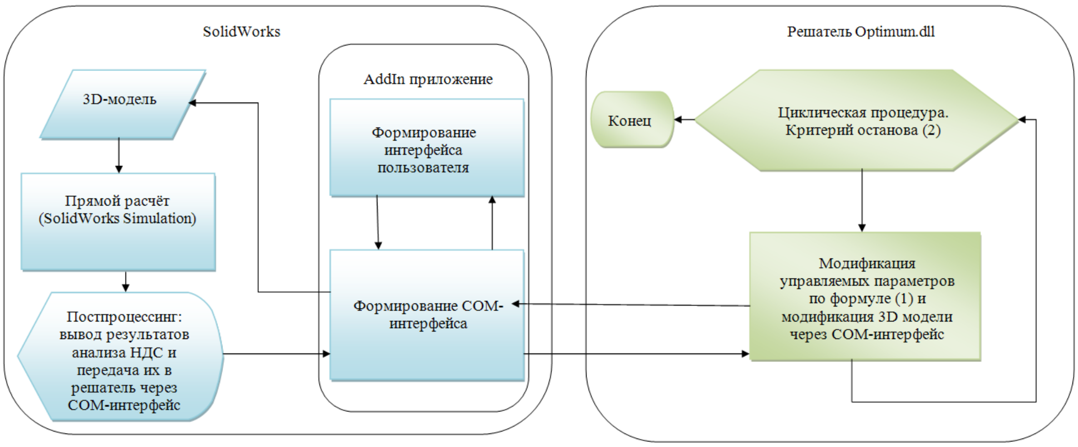
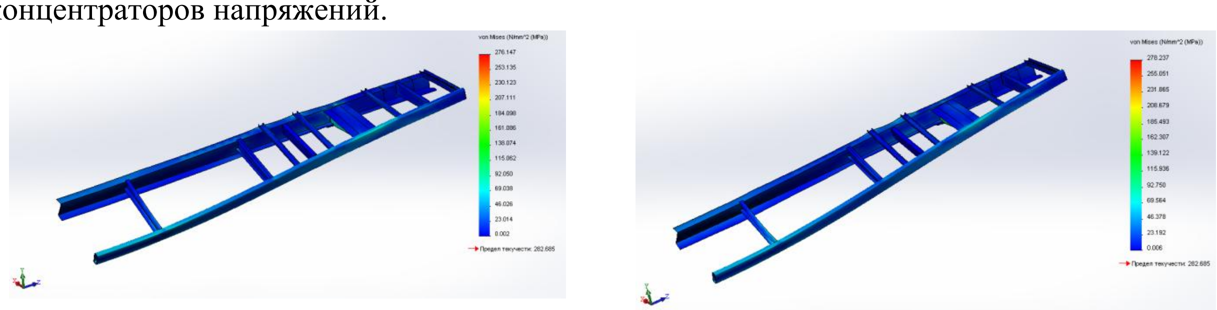


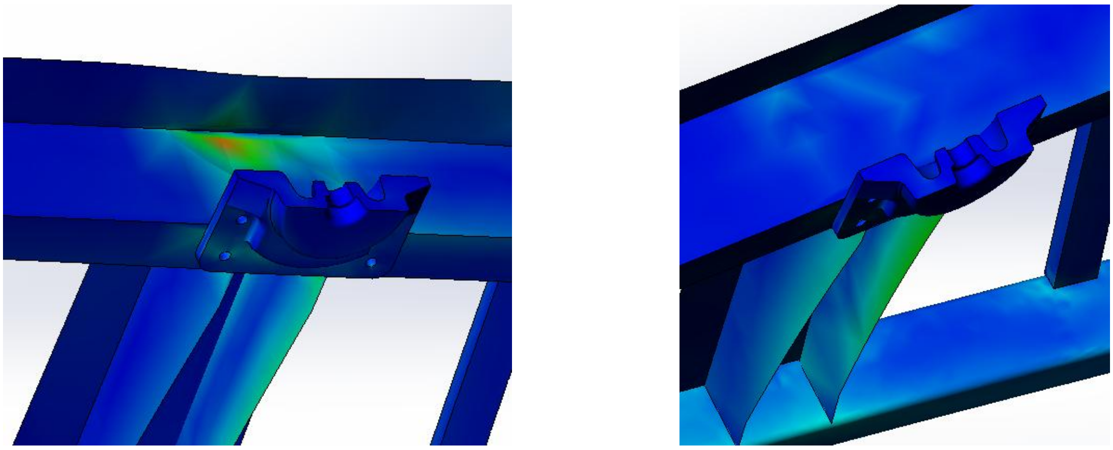
Рис. 7. Блок-схема алгоритма

4. Результаты дискретно равнопрочного проектирования

Для решения задачи дискретно равнопрочного проектирования из соображений симметрии используется ¼ модели с соответствующими граничными условиями (рис. 8). В качестве внешних воздействий рассматривается нагружение по варианту 1, компоненты которого пропорционально увеличены на столько, что максимальное напряжение в конструкции близки к пределу текучести. На рис. 8 (а) и (б) приведены результаты анализа напряженно-деформированного состояния соответственно для исходной и равнопрочной конструкции соответственно, а на рис. 8 (в) и (г) – те же результаты для концентраторов напряжений.



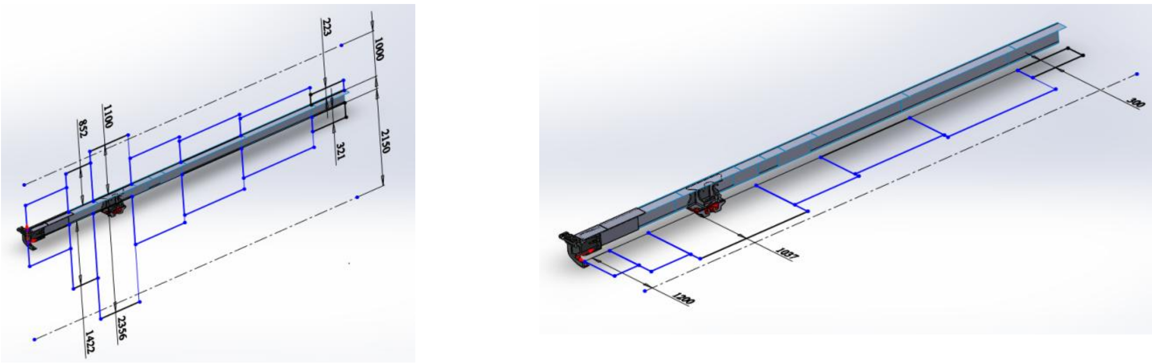
(а) (б)



(в) (г)

Рис. 8. Напряженно-деформированное состояние для исходного и для дискретно равнопрочного проекта.

Решение получено за 46 итераций при ε=0,001, количество управляемых параметров 21. Наибольший интерес представляет картина распределения толщин вдоль оси по z-образной хребтовой балке. На рис. 9 (а) представлены результаты распределения толщины по верхней и нижней полке в масштабе 100:1, а на рис. 9 (б) распределение толщины по стенке в том же масштабе, осевыми линиями показано исходное значение распределённой толщины. Экономия материала в равнопрочном варианте по сравнению с исходным составляет 26%.



(а) (б)

Рис. 9. Распределение толщины вдоль хребтовой балки, соответствующее дискретно равнопрочному проекту

Заключение

Равнопрочное проектирование не является оптимальным в строгом понимании этого термина, т.е. оно не обеспечивает минимум массы конструкции при условии выполнения ограничений по прочности. Однако решение подобных задач методами НМП в пространстве оптимизации столь высокой размерности потребовало бы весьма значительного времени и вычислительных ресурсов, доступных далеко не всякому инженеру. Таким образом, разработанное программное обеспечение вполне может использоваться в практике рационального конструирования и проектирования с соответствующей экспериментальной проверкой.

Список литературы

1. Малков В.П., Угодчиков А.Г. Оптимизация упругих систем. М.: Наука, 1981. 288 с.
2. Вохмянин И.Т., Немировский Ю.В. Проектирование равнопрочных упругих тороидальных оболочек вращения в условиях термосилового нагружения // Доклады Академии наук высшей школы РФ. 2011. № 2 (17). С. 65-77.
3. Терновой А.В. Оценка неравнопрочности конструкции при выборе оптимального варианта // Вестник машиностроения. 2012. № 9. С. 87-88.
4. Чугунов М.В., Небайкина Ю.А. Программный модуль для решения задач оптимального проектирования в среде SolidWorks на базе API // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2011. № 9. Режим доступа: http://technomag.edu.ru/doc/206217.html (дата обращения 01.08.2014).

.

Science & Education of the Bauman MSTU Electronic journal
ISSN 1994-0448

Science and Education of the Bauman MSTU, 2014, no. 9, pp. 216–226.

DOI: **10.7463/0914.0726307**

Received: 01.08.2014
Revised: 01.09.2014

Analysis and Design of Rolling Stock Elements

M.V. Chugunov[1,*], V.V. Osyka[1], S.P. Kudaev[1], N.D. Kuzmichyov[1], V.N. Klyomin[1]

[*]m.v.chugunov@mail.ru

[1]Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia

Keywords: FEM, CAD/CAE/CAM, optimization, API, equal-strength, AddIn-application, COM-technology, force structure of rolling stock

The work solves the problem of equal-strength design of the rolling stock elements in option of discrete equal-strength. For this purpose, has been developed the software built in SolidWorks and SolidWorks Simulation as an AddIn-application using necessary basic functionality and extending it in the specified part on the basis of API SolidWorks and COM technology.

The SolidWorks software is used to develop a 3D-model for general force frame of the wagon as an assembly. As this assembly is quite complicated and includes many elements both standard, and non-standard type, 3D - specification is developed by 3Dvia Composer software, which is included in the article in the form of the gif-animation and via-roller. This means is very useful for the evident analysis of topology and geometrical properties of a design as a whole, facilitates a procedure of adequate formation of the FE model providing accuracy and profitability of computing. From the point of view of profitability and opportunities of definition of concentrators of stresses with a sufficient accuracy for practice the combined model including volume and shell FEM is optimum.

In the work the analysis results of stress-strain state of a design are given in two options of static loading in the form of stress diagrams, the main areas of stress concentration are revealed.

Results of equal-strength design in the form of thickness distribution on thin-walled elements of a design, considered within FEM as shells, are received. It is shown that the developed software doesn't allow optimum design results, however it is economically viable, simple in use and can be applied to the solution of problems of rational design in design practice.

SolidWorks, as well as the majority of similar CADs, possess an open architecture and allow users to apply its functionality. This work continues a series of publications of the author of this paper and other authors concerning the API-based CAD/CAE adaptation and development.

References

1. Malkov V.P., Ugodchikov A.G. *Optimizatsiia uprugikh system* [Optimization of elastic systems]. Moscow, Nauka Publ., 1981. 288 p. (in Russian).
2. Vokhmianin I.T., Nemirovskii Iu.V. Design of the uniformly strong elastic toroidal shells of revolution under the conditions of termo-force loading. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly RF*, 2011, no. 2 (17), pp. 65-77. (in Russian).
3. Ternovoi A.V. Grade of design strength disbalance for optimum alternative decision. *Vestnik mashinostroeniia*, 2012, no. 9, pp. 87-88. (in Russian).
4. Chugunov M.V., Nebaikina Iu.A. Software for Optimum Design Based on SolidWorks API. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana = Science and Education of the Bauman MSTU*, 2011, no. 9. Available at: http://technomag.edu.ru/doc/206217.html , accessed 01.08.2014. (in Russian).