

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ



УДК 519.876.5

Проблемы построения и методы оптимизации CAD моделей для моделирования процессов вакуумной инфузии

Н.Д. Клеймёнов

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Аннотация

При моделировании процесса вакуумной инфузии с использованием метода конечных элементов возникают проблемы, связанные с топологией CAD модели детали, которая применяется для анализа. Эти проблемы проявляются в областях с большим количеством мелких элементов, искажающих результаты графиков параметров процесса, а также приводят к различным программным ошибкам. Для их решения была проведена оптимизация исходной CAD модели, которая включала удаление ненужных для данного моделирования элементов и исправление геометрии поверхностей детали. Основная суть методики оптимизации заключается в создании новой CAD модели, основанной на исходной, с минимальными отклонениями в формообразующих поверхностях и устранением всех недостатков оригинальной модели. Результаты работы показали, что при разбиении оптимизированной CAD модели на конечные элементы удалось добиться сокращения количества элементов, их более равномерного распределения и минимизации концентраций элементов маленького размера. Оптимизация значительно снизила количество ошибок, возникающих при моделировании процесса, а также сократила время, необходимое для вычислительных операций.

Ключевые слова: вакуумная инфузия, топология CAD модели, реверс-инжиниринг, моделирование процесса методом конечных элементов, оптимизация CAD модели, снижение временных затрат, повышение эффективности моделирования процессов

Для цитирования. Клеймёнов Н.Д. Проблемы построения и методы оптимизации CAD моделей для моделирования процессов вакуумной инфузии. *Молодой исследователь Дона*. 2025;10(3):50–53.

Problems of Creating CAD Models for Vacuum Infusion Process and Methods for Optimization Thereof

Nikita D. Kleimenov

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Abstract

When modeling the vacuum infusion process using the finite element method, in a CAD model of a part under analysis, there arise problems in topology. These problems reveal in the areas with a large number of small elements that distort the resulting graphs of the process parameters, as well as lead to various software errors. Optimization of an original CAD model was carried out to solve these problems, which included deleting the elements unnecessary for this modeling and correcting the geometry of part's surfaces. The essence of optimization technique consisted in creation of a new CAD model based on the original one, with minimal distortion of the form making surfaces and correction of all the shortcomings of the original model. The results of the research revealed that by dividing the optimized CAD model into finite elements, it was possible to reduce the number of elements, distribute them more evenly, and minimize concentration of small elements. Due to optimization, a number of errors occurring during modeling, as well as time required for computational operations, reduced significantly.

Keywords: vacuum infusion, topology of a CAD model, reverse engineering, modeling using finite element method, CAD model optimization, reduction of time consumption, improvement of modeling process efficiency

For Citation. Kleimenov ND. Problems of Creating CAD Models for Vacuum Infusion Process and Methods for Optimization Thereof. *Young Researcher of Don*. 2025;10(3):50–53.

Введение. Для моделирования процесса изготовления деталей методом вакуумной инфузии используется специализированное программное обеспечение, которое моделирует происходящие процессы с применением метода конечных элементов. В программу загружается исходная CAD модель детали, которая затем разбивается на отдельные треугольные элементы, формируя сетку, после чего осуществляется расчет параметров для каждого элемента. Таким образом, время расчета напрямую зависит от количества элементов, на которые разбивается деталь. В случае математически сложных расчетов время вычислений может достигать нескольких часов, даже при использовании мощной вычислительной техники. При этом зачастую для подбора оптимальных параметров процесса необходимо провести несколько десятков моделирований, что может занять значительное количество времени. Поэтому целесообразно осуществлять разбиение модели на максимально малое количество элементов, сохраняя при этом адекватность производимых расчетов.

Проблема корректного разбиения модели детали на конечные элементы связано с неправильной топологией исходной CAD модели. При разбивке на элементы программное обеспечение воспринимает каждый стык, отверстие и линию на поверхности как отдельный элемент, что приводит к резкому уменьшению размера элементов в этих местах и, соответственно, к увеличению их количества.

Основная часть. Для предотвращения различных проблем при моделировании процессов была проведена работа и разработана методика оптимизации CAD моделей. Основная цель данной работы заключается в устранении из CAD модели элементов, которые существенно увеличивают трудоемкость вычислений при моделировании, но не являются значительными для процесса вакуумной инфузии. В качестве программного обеспечения для расчета параметров процесса вакуумной инфузии используется расчетная модель [1], созданная в среде конечного элементного моделирования COMSOL Multiphysics 6.1. Для моделирования и изменения CAD модели детали применяется Siemens NX. Рассматриваемая деталь представляет собой условную деталь обшивки с изгибом в двух направлениях, вырезами и набором отверстий (рис. 1).

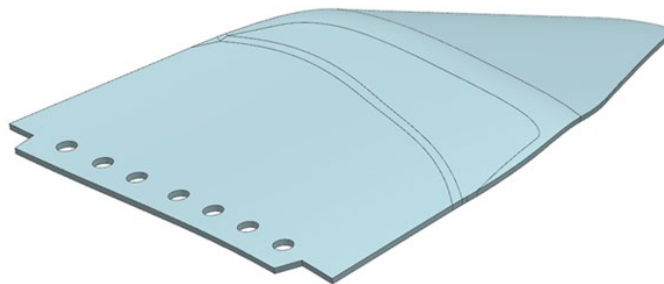


Рис. 1. Исходная CAD модель детали «Обшивка»

Исходная модель представляет собой точную CAD модель готовой детали, которая изготавливается методом вакуумной инфузии. Модель допускает импорт в программное обеспечение для моделирования процесса и разбиение на конечные элементы. В результате разбиения получается 99301 элемент. На изображении сетки конечных элементов наблюдается скопление треугольников малого размера в местах стыковки поверхностей и вокруг отверстий (рис. 2).

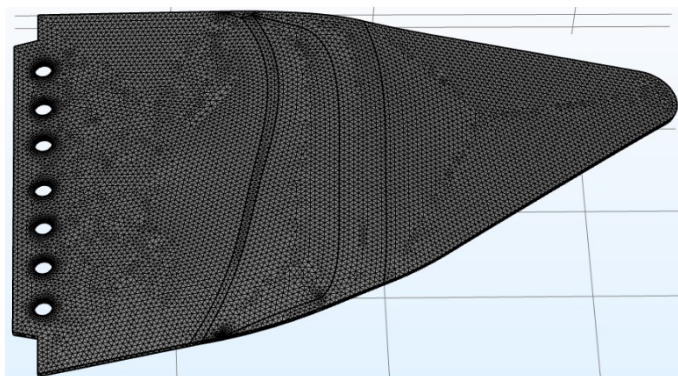


Рис. 2. Разбиение на конечные элементы исходной CAD модели детали «Обшивка»

При этом на этапе проведения вакуумной инфузии и после постотверждения изготавливается лишь заготовка детали, а вырезы и отверстия выполняются при последующей механической обработке. Это означает, что во время вакуумной инфузии данных элементов нет, и, следовательно, в моделировании процесса нет смысла их учитывать. Поэтому все поверхности желательно лишить стыков, смоделировав их как единую гладкую поверхность.

Для достижения этих целей необходимо перемоделировать исходную деталь. В первую очередь удаляются все отверстия и вырезы. В программном обеспечении Siemens NX для удаления отверстий существует несколько подходов. Во-первых, с помощью инструмента «Удалить грань» в режимах «Отверстие» или «Грань» можно выделить и удалить все отверстия. Во-вторых, применяя инструмент «Вытягивание», можно выбрать контур отверстий и вытянуть его с обрезкой по поверхностям детали. В-третьих, с помощью инструмента «Зашивка отверстий» выбирается поверхность детали и контуры отверстий, что позволяет зашить их поверхностями. Затем аналогичные действия выполняются с обратной стороны отверстия. Также можно воспользоваться инструментом «Копировать грань», чтобы скопировать внутренние поверхности отверстий, а после этого сшить полученные поверхности в тела и объединить с основным телом детали. При возможности следует удалить и вырезы с помощью инструмента «Удалить грань».

Создание новой гладкой поверхности начинается с выделения лицевой поверхности детали. Затем выполняется расширение этой поверхности на область с непрерывной кривизной по касательной, выходящей за пределы данной области (примерно на 50 мм по периметру). Полученная поверхность рассекается набором параллельных плоскостей, при пересечении с которыми формируются кривые, служащие каркасом для построения новой теоретической поверхности. Далее контур детали проецируется на новую поверхность и объединяется в единую линию сплайна. Новая теоретическая поверхность обрезается по контуру полученной кривой, что дает лицевую поверхность детали, свободную от стыков. Тело детали формируется внутри новой лицевой поверхности с помощью инструмента «Утолщение». Аналогичным образом возможно смоделировать обратную поверхность, вытянув кривую контура по нормали к поверхности, а затем обрезать излишние участки и объединить их в твердое тело. Для всех этих операций используются инструменты для работы с кривыми и поверхностями, могут применяться описанные ранее способы редактирования модели и иные доступные инструменты.

Представленная общая инструкция используется для деталей типа «Обшивка». Для других деталей и в случаях сложной геометрии могут потребоваться другие инструменты создания и оптимизации поверхностей и тел, доступные в используемом программном обеспечении. По своей сути эта операция представляет собой создание новой модели на основе уже существующей. Происходит реверс-инжиниринг CAD модели, в результате чего получается модель, свободная от всех лишних элементов и стыков на поверхностях (рис. 3).

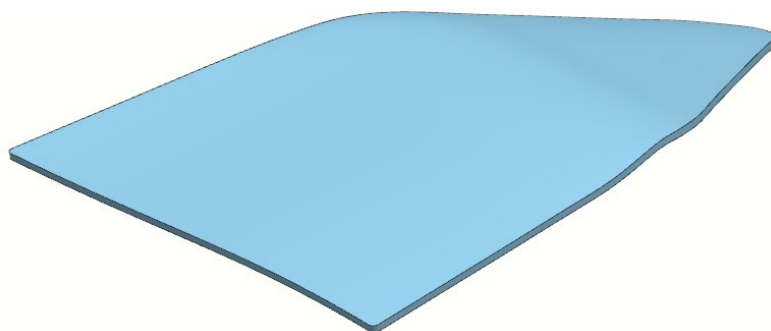


Рис. 3. Оптимизированная CAD модель детали «Обшивка»

При этом отклонение лицевой поверхности от оригинальной детали составляет $\pm 0,001$ мм (рис. 4), а количество конечных элементов, на которые разбивается модель, составляет 77089 элементов, при этом их размер и расположение стали более равномерными (рис. 5).

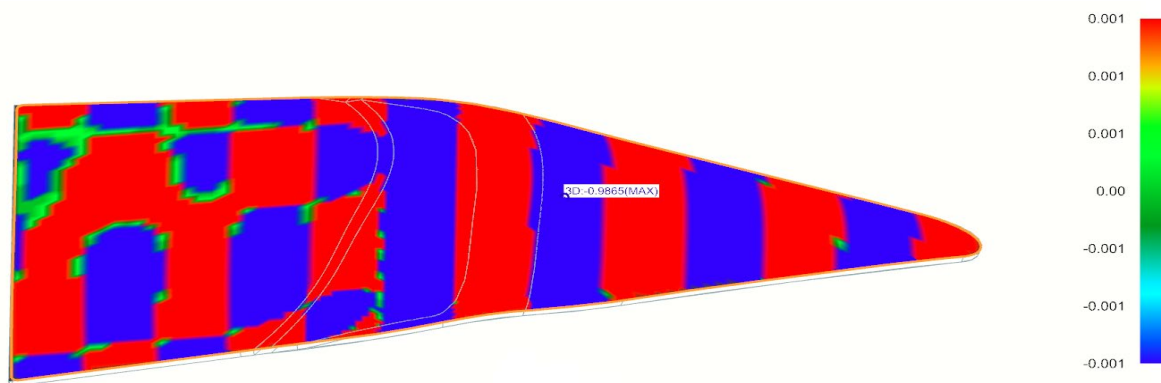


Рис. 4. Отклонение оптимизированной CAD модели детали «Обшивка» в сравнении с исходной

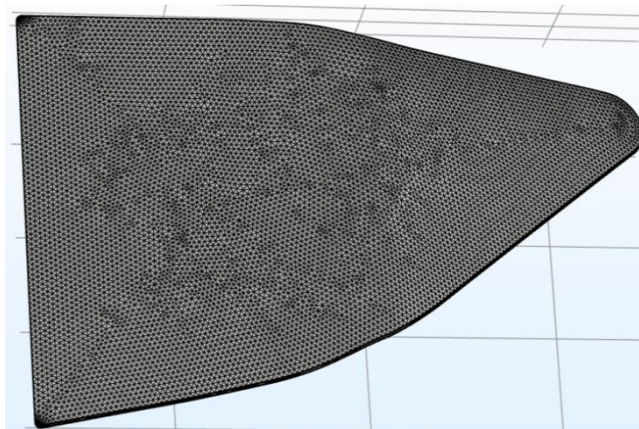


Рис. 5. Разбиение на конечные элементы оптимизированной CAD модели детали «Обшивка»

Оптимизация модели заключается в создании новой версии на основе имеющейся модели детали. В результате полученная новая модель обладает геометрией, лишенной стыков и других нарушений топологии, которые могут приводить к искажению качества моделирования процесса и значительно увеличивать вычислительную сложность, затрудняя выбор оптимальных режимов процесса. В частности, в ходе проведенной работы были устранены места скопления значительного количества мелких элементов, сокращая их общее количество на 22 %. Для других моделей деталей этот показатель может оказаться даже выше, что приведет к ощутимому снижению вычислительной нагрузки и увеличению скорости моделирования. Более того, для успешного компьютерного моделирования и оптимизации вакуумно-инфузионного формования тонкостенной детали требуется использовать две CAD модели: сама формуемая деталь и оснастка для формования этой детали. При проведении оптимизации и модели оснастки эффект еще больше усилится, что позволит значительно сократить время моделирования.

Эффективность и корректность разработанной методики были проверены на компьютерных моделях процесса, и она обеспечивает точность выполнения всех граничных условий.

Заключение. Учитывая, что топологические ошибки моделей деталей значительно осложняют проведение необходимых вычислений для моделирования процессов, иногда искажают полученные результаты, вызывают ошибки и даже не позволяют программному обеспечению выполнить расчет, была проведена работа по оптимизации CAD модели. В ходе этого процесса было осуществлено сравнение количества конечных элементов, на которые разбиваются исходная и оптимизированная CAD модели. Результаты показали, что оптимизация исходных CAD моделей является необходимым шагом перед любым исследованием этих моделей с использованием метода конечных элементов.

Получена и изложена краткая методика по оптимизации CAD моделей. Применение данных шагов позволило сократить временные затраты и вычислительные ресурсы для проведения исследований по моделированию процесса вакуумной инфузии и подбору параметров технологического процесса. Внедрение этой операции оптимизации позволит существенно ускорить процесс моделирования, а, следовательно, ускорит и запуск производства деталей. Более того, данный принцип применим не только для технологии вакуумной инфузии, но и для других технологий, требующих моделирования процессов методом конечных элементов.

Список литературы

1. Жиляев И.В., Асташенко Д.С., Шевцов С.Н., Хуанг Ч.П., Снежина Н.Г. Моделирование процесса постинфузионного выравнивания пористости и толщины композитных преформ при воздействии управляемых давлений. *Вестник ПНИПУ. Машиностроение. Материаловедение*. 2022;24(4):5–17.

Об авторе:

Никита Дмитриевич Клеймёнов, магистрант кафедры проектирования и производства летательных аппаратов Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ybr.rk@mail.ru тел.89888937994

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Author:

Nikita D. Kleimenov, Master's Degree Student of the Design and Production of Aircraft Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), ybr.rk@mail.ru

Conflict of Interest Statement: the author declares no conflict of interest.

The author has read and approved the final manuscript.