

In the present study, the effect of free edge on residual stresses inherited during manufacturing of thermoset multilayered composites was investigated. The behavior during the manufacturing cycle of well-known AS4/8552-1 carbon-epoxy composite was studied by means of finite element modeling in ABAQUS software. Constitutive relations of the composite material characterizing the manufacturing process – including processes of formation, polymerization, and development of residual strains and stresses was performed by developed user subroutine-UMAT, which describes the visco-elastic behavior and composite material characteristics changes due to matrix solidification. The program was implemented in ABAQUS and validated based on experiments of specimens curing. Related thermal and strength problem under plane strain conditions was solved during the simulation.

Keywords: residual stress, composite, stress relaxation, free edge.

УДК 519.6

ПРОГРАММА ДЛЯ ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ КОНСТРУКЦИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЯЧЕЙСТЫХ (РЕШЁТЧАТЫХ) СТРУКТУР

А. Н. Быков, В. В. Попов, Е. А. Сеницын, Д. Ю. Дьянов, М. В. Медведкина

Российский федеральный ядерный центр –
Всероссийский НИИ экспериментальной физики, Саров

В рамках проекта «Разработка атласа типовых форм для топологической оптимизации конструкций, формируемых методом селективного лазерного плавления, и их производственная верификация», участниками которого являются НИТУ «МИСиС», АО «НПО «ЦНИИТМАШ», ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», ведется разработка программного обеспечения для подготовки компьютерных моделей деталей в аддитивном производстве, позволяющего проводить топологическую оптимизацию деталей (на основе решения линейных задач статической прочности с различными ограничениями целевой функции), генерировать и использовать различные типы ячеистых (решётчатых) структур для заполнения объёма деталей. В статье приведено краткое описание базовой версии создаваемого программного обеспечения.

Ключевые слова: аддитивные технологии, селективное лазерное плавление, топологическая оптимизация, ячеистые структуры, решётчатые структуры, генеративный дизайн, неявное представление геометрии, TPMS структуры.

Введение

Огромный практический интерес в области аддитивных технологий представляет создание деталей сложных форм посредством генеративного дизайна с использованием топологической оптимизации и решётчатых структур, что позволяет более эффективно использовать материал (за счёт этого достигается его экономия), создавать облегченные конструкции, уменьшать время изготовления деталей. Функциональность для выполнения топологической оптимизации деталей, а также для создания и использования ячеистых (решётчатых) структур отсутствует в современных САД пакетах, что существенно затрудняет подготовку деталей генеративного дизайна в них. Существует необходимость создавать специальное программное обеспечение (ПО), поскольку для реализации

указанной функциональности ПО должно включать в себя модули топологической оптимизации формы деталей, построенные с использованием расчётных CAE модулей (численные прочностные, тепловые расчёты и пр.), а также модули для генерации и вписывания ячеистых (решётчатых) структур в геометрию детали. Ряд крупных мировых компаний, специализирующихся на создании CAE программного обеспечения, в последние годы уже предложили свои программные продукты.

Топологически оптимизированные детали с решётчатыми структурами внутри, выполненные из металлов и сплавов по аддитивным технологиям (SLM – послойное лазерное сплавление или аналогичные) находят свое применение в авиакосмической промышленности, медицине и других областях. Примерами деталей могут служить различные топологически оптимизированные кронштейны (минимальная масса при сохранении заданного уровня свойств), миниатюрные теплообменники с высокими удельными характеристиками, медицинские импланты и протезы с решётчатыми структурами внутри, которые обеспечивают снижение массы и хорошее сращивание с костной тканью.

В рамках договора с НИТУ «МИСиС» «Разработка программного обеспечения для топологической оптимизации конструкций, формируемых методом селективного лазерного плавления» (в рамках проекта «Разработка атласа типовых форм для топологической оптимизации конструкций, формируемых методом селективного лазерного плавления, и их производственная верификация», ведутся работы по созданию ПО для подготовки компьютерных моделей топологически оптимизированных деталей, а также для создания и использования в них ячеистых (решётчатых) структур. В конце 2018 г. планируется представить базовую версию данного ПО.

В статье кратко описаны различные аспекты разработки данного программного обеспечения. В частности, уделено внимание: построению различных ячеистых (решётчатых) структур, в том числе TPMS, использованию неявного представления геометрии деталей и топологической оптимизации. Проиллюстрированы приемы работы с программой, пользовательский интерфейс, приведены примеры построенных деталей.

Идеи и подходы, положенные в основу программы

Программа построена как многооконное графическое приложение написанное на языке программирования C++ с применением библиотек Qt и OpenGL. В каждом дочернем окне можно строить собственные детали или их части. Общие элементы программы – панели кнопок, боковые панели позволяют работать с активным дочерним окном. Между окнами можно осуществлять обмен деталями (копирование, вставка). Внешний вид программы и некоторые построенные в ней детали показаны на рис. 1.

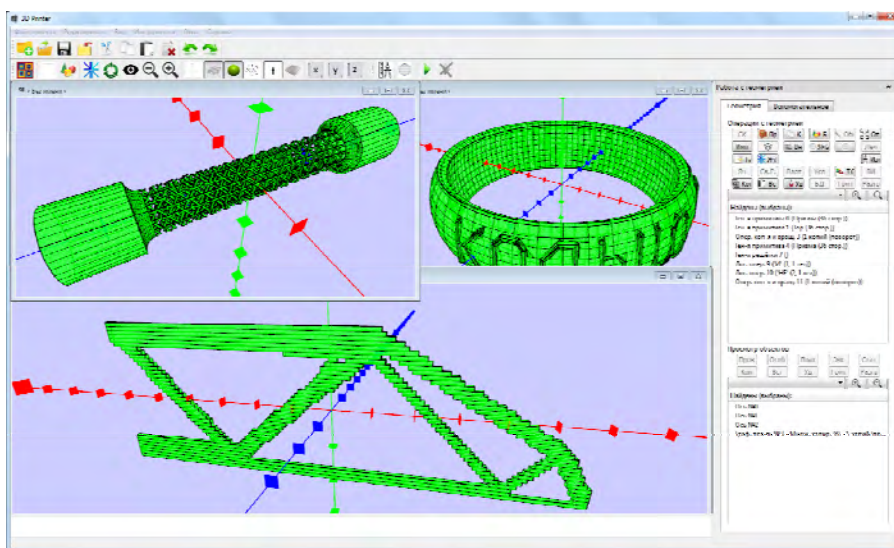


Рис. 1. Внешний вид программы

Формирование деталей в любом дочернем окне осуществляется путем создания последовательности операций (рис. 2 – пример формирования детали), каждая из которых задается собственным пользовательским диалогом, и после выполнения формирует собственный результат, который отображается в текущем окне и доступен для последующего выбора в других диалоговых окнах. Любую из предыдущих операций можно посмотреть, отредактировать и выполнить заново, что позволяет при формировании сложных деталей поменять параметры отдельных операций и сгенерировать заново результат всех последующих операций, что приведет к учёту сделанных изменений. Такая тактика построения деталей позволяет не только отслеживать цепочку построения деталей и иметь возможность перестроить детали с измененными параметрами, но и реализовать внутренний скриптовый язык описания последовательности построения деталей, а также использовать этот скриптовый язык для компактной записи деталей на диск в форме описания цепочки операций, приводящих к построению деталей.

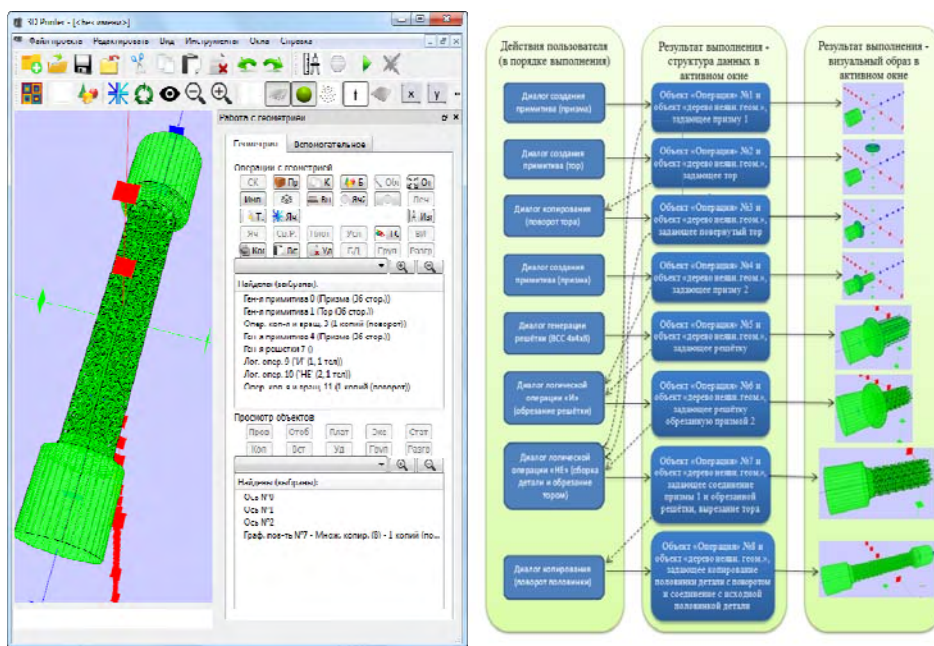


Рис. 2. Пример последовательности операций для формирования детали

Результат любой операции, заданной диалогом пользователя, хранится в программе в одном из четырех внутренних представлений данных (соответствующие структуры данных), по которым строится визуализация геометрии деталей в дочернем окне с возможностью последующего экспорта. Структуры данных позволяют работать с объектами заданными в виде:

- фасеточной поверхности (совокупность фасетов, являющихся выпуклыми N-угольниками);
- балочного представления (совокупность узлов и рёбер их соединяющих, с информацией о диаметре рёбер и количестве граней);
- деревьев объектов неявной геометрии (совокупность объектов, описывающих построение деталей из множеств посредством логических операций и с возможностью изменения формы множеств в зависимости от дополнительных параметров, а также с определенной целевой функцией, значение которой для произвольной точки пространства позволяет определить принадлежность детали и расстояние до поверхности);
- массивов из объектов трёх предыдущих представлений.

Наличие этих представлений геометрических объектов следует из основных требований, предъявляемых к программе: операции над решётчатыми структурами, (имеют большую сложную поверхность); импорт/экспорт деталей в фасеточном представлении; создание и редактирование относительно простых деталей; подготовка данных и топологическая оптимизация деталей (наличие и использование расчётной сетки).

Визуализация любых геометрических объектов осуществляется в фасеточном или балочном представлении (для решёток). Поскольку деревья неявной геометрии абстрактно описывают построение геометрических объектов, то для визуализации их в программе есть код для построения фасеточного представления деревьев неявной геометрии.

Операции, задаваемые в диалоговых окнах, используют и формируют тот или иной вид (представление) объектов геометрии, посредством алгоритмов, позволяющих выполнять действия над объектами геометрии в том или ином внутреннем представлении.

Для выполнения операции топологической оптимизации предусмотрено задание необходимых данных в программе, после чего формируются файлы необходимых исходных данных для топологической оптимизации, и происходит запуск расчётного модуля топологической оптимизации. После расчётов результат топологической оптимизации загружается в программу и может быть использован для создания более сложных деталей.

Топологическая оптимизация является математическим подходом, решающим проблему оптимального распределения материала в ограниченном пространстве, с учетом действующих нагрузок и граничных условий. Данный вид оптимизации используется на стадии разработки первоначальной вида конструкции. Полученное оптимальное решение затем модифицируется и «доводится» с учетом функциональных и технологических требований. Это позволяет сэкономить время на первоначальном этапе проектирования. Следует отметить, что полученные в результате оптимизации конструкции, хотя и являются оптимальными, могут быть слишком дороги или сложны в производстве. Фактически, в основном, оптимизация сводится к уменьшению веса конструкции путём удаления, наименее вовлеченного в работу материала [1 – 3]. В последнее время появились методы, позволяющие находить оптимальную топологию с множеством критериев и ограничений. Критерии включают в себя напряжения, жёсткость, критическую нагрузку, частоту, момент инерции. Таким образом, каждое значение, которое может быть измерено, и каждый процесс, который может быть проанализирован, могут быть учтены в процессе топологической оптимизации.

В расчётном модуле в настоящее время реализован расчёт двумерных и трёхмерных задач топологической оптимизации методами BESO, PTOS, SIMP [1, 3] на основе решения линейных задач статической прочности с различными ограничениями целевой функции.

Метод BESO (bi-directional evolutionary structural optimization) построен на основе алгоритма эволюционной оптимизации конструкций. BESO метод [4 – 5] позволяет материалу быть удаленным и добавленным одновременно. Родоначальником метода BESO являются Yang и др. [6]. В их работах величина чувствительности неактивных элементов оценена посредством линейной экстраполяции смещения конечно элементного анализа. Элементы сплошной среды с самой низкой чувствительностью удаляются из структуры, а недействительные элементы с самой высокой чувствительностью снова добавляются в расчет.

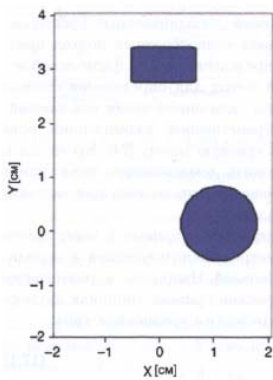
Методы SIMP (Solid Isotropic Material with Penalization) [3, 7] и PTOS (Proportional Topology Optimization Stress) [8] реализованы на основе критерия оптимальности и являются наиболее фундаментальными по сравнению с другими математическими методами, и впервые были введены для решения задач структурного дизайна Прагером [9]. В этих методах проектные переменные в элементах пропорциональны значению целевой функции. Элементы в конечно-элементной модели удаляются и добавляются в соответствии с критерием оптимальности [10].

Из указанных выше 4 видов структур данных, для хранения геометрических объектов, необходимо более подробно рассмотреть дерево неявной геометрии. Другие структуры данных (фасеточное и балочное представление, массивы из объектов разного вида) для описания геометрических объектов являются очевидными, ввиду чего здесь не приводятся. Реализованные в программе алгоритмы выполняются над различным внутренним представлением геометрии деталей и подробно здесь не рассматриваются.

Использование решётчатых структур при конструировании моделей деталей (в частности для заполнения внутреннего объема деталей) сопряжено с необходимостью хранить и обрабатывать большие массивы геометрической информации. В книге известных авторов [11] посвященной современному состоянию аддитивных технологий в разделе, где уделяется внимание программному обеспечению, авторы отмечают, что явное представление (построение и хранение) сложной внут-

ренной ячеистой структуры и генерация для таких структур поверхностной или объемной сетки в современных САД и САЕ пакетах затруднена. Это объясняется тем, что они изначально создавались для работы с деталями с более простой геометрией и, как правило, используют для представления деталей либо сплайны (Non-Uniform Rational B-Spline – NURBS) либо представление поверхности в виде совокупности треугольников или полигонов (также могут быть использованы и другие способы: Rational Gaussian (RaG) surfaces; Fourier Shape Descriptions [11]).

В качестве перспективного направления для решения этой задачи, которое позволяет преодолеть существующие ограничения и трудности работы с ячеистыми структурами, авторы указывают неявное моделирование геометрии - представление и хранение геометрии в виде совокупности математических символьных выражений, описывающих элементы структур, с использованием логических (булевых) операций. Т. е. для описания двумерной области (рис. 3, приведен из [11]) необходимо определить её границы путем записи уравнений для каждого фрагмента границы и объединения с помощью логических операций (можно заменить на \min и \max). Точки, для которых полученная функция имеет положительные значения, определяют заданную область на плоскости (пример на рис. 3). Такое задание геометрии позволяет вводить параметры для последующего варьирования свойств структур и задавать сеточное разбиение.



$$w_1(x) = \frac{4 - x^2}{4},$$

$$w_2(y) = \frac{8 + 2y - y^2}{9},$$

$$w_3(x) = x^2 - 0,25,$$

$$w_4(y) = 2(y - 3)^2 - 0,125,$$

$$w_5(x, y) = \frac{1}{2r^2} \left[(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2 - r^2 \right].$$

$$W = w_1 \wedge w_2 \wedge (w_3 \vee w_4) \wedge w_5$$

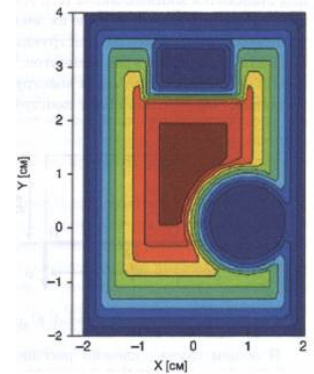


Рис. 3. Пример неявного моделирования области [11]

В рамках разработки программы, руководствуясь общим представлением данных идей в указанной выше книге [11], была сделана попытка реализовать данный подход для генерации ячеистых (решётчатых) структур, а также использовать его для работы с любыми другими объектами геометрии.

Программная реализация подхода неявного представления геометрии объектов включает функциональность для построения внутренних структур данных – деревьев, задающих неявное представление геометрии объектов (нет явного задания элементов поверхности), и функциональность для построения в программе визуальных образов этих структур данных – привычного фасеточного представления поверхности заданных объектов. Деревья с неявным представлением геометрии объектов (далее для краткости «дерева неявной геометрии») в программе строятся следующим образом.

1) Любое дерево состоит из объектов, каждый из которых описывает некоторое множество.

2) Между объектами в дереве определены логические операции, которые позволяют определить новые множества, и задаются с помощью установки внутри объекта двух переменных (типа bool). Одна переменная указывает, какая выполняется логическая операция над множествами или плоскостями в объекте – «И» или «ИЛИ», а вторая переменная задает выполнение операции «НЕ».

3) Каждое элементарное множество (простейшее множество) выпукло и задано совокупностью плоскостей. При этом выполняются следующие условия:

– задаваемое множество должно находиться в положительном полупространстве;

– каждое уравнение плоскости задано в виде $Ax + By + Cz + D + \varphi(x, y, z, p) = 0$, где $\varphi(x, y, z, p)$

задаёт изменение плоскости при изменении дополнительного параметра p (это необходимо для «морфинга» – изменения формы деталей, функция может быть линейной, и в простом случае задаёт отступ от поверхности на заданное расстояние, а в более сложном случае изменение положения каждой от-

дельной плоскости множества, что в совокупности может приводить к изменению множества, например, вдоль заданного направления – построение решётки с градиентом плотности).

4) Определена целевая функция для любой точки пространства, модуль значения которой равен минимальному расстоянию до поверхности (0 – поверхность), а знак указывает на принадлежность детали («+» внутри, «-» снаружи). Данная функция вычисляется рекурсивно по дереву неявной геометрии с использованием уравнений плоскостей и переменных, задающих логические операции над объектами в дереве. Операции «И» соответствует \min в целевой функции на данном уровне, а операции «ИЛИ» соответствует \max в целевой функции, операция «НЕ» получается инверсией результата предыдущего уровня для вырезаемого множества.

Построение любой детали или решётчатой структуры сводится к построению соответствующего дерева неявной геометрии, по которому в программе строится визуальный образ детали, а также экспортируемое из программы фасеточное представление детали. При работе с геометрией деталей выполняются следующие операции над деревьями неявной геометрии.

Создание простейшего выпуклого множества (элементарного множества) выполняется путём создания дерева с единственным объектом, содержащим набор плоскостей, которые задают грани множества.

Создание сложного множества из элементарных или сложных множеств посредством задания логических операций между множествами (выполнение логических операций) осуществляется путём построения дерева неявной геометрии, которое состоит из деревьев, описывающих исходные элементарные множества. При этом кроме копирования деревьев исходных множеств надо задать переменные, устанавливающие посредством логических операций отношения между ними на данном уровне нового дерева.

Копирование множеств N раз осуществляется путём создания дерева неявной геометрии, куда N раз скопировано дерево неявной геометрии для исходного множества и при этом коэффициенты плоскостей изменены для расположения копии в заданном месте пространства.

Создание элементарной ячейки решётки производится путём создания дерева неявной геометрии, где каждое ребро решётки описано n -угольной призмой. Для всех призм выполнена операция «ИЛИ» (объединение множеств).

Создания массива ячеек решётки осуществляется копированием деревьев для элементарных ячеек решётки.

Геометрические преобразования над объектами (сжатие, растяжение, поворот, перенос и т. д.) осуществляется путём изменения коэффициентов плоскостей в дереве неявной геометрии.

Выполнение отступа внутрь или наружу (в общем случае «морфинг» – изменение формы объекта) осуществляется путём подстановки значения дополнительного параметра p в функции $f(x, y, z, p)$ в уравнениях плоскостей, описывающих множества в дереве неявной геометрии. В случае если необходимо получать решётки с градиентом плотностей, дополнительно следует решать задачу о вычислении новых значений коэффициентов плоскостей по ряду условий (заданный объем ячейки решётки, известные сечения рёбер решётки на границе элементарной ячейки решётки, неразрывность рёбер решётки на границах ячеек, пр.).

Стоит отметить, что поиск подобных идей работы с геометрией в литературе выявил наличие краткого описания данных идей (неявное задание геометрии, представление объектов в виде деревьев, описывающих их построение посредством логических операций из более простых множеств) в ряде книжек, в частности в [12].

Рассмотренный подход построения геометрических объектов, в том числе и ячеистых (решётчатых) структур в виде деревьев неявной геометрии имеет свои плюсы, поэтому он широко использован в программе. Однако в случае TPMS структур (Triply-Periodic Minimal Surfaces, периодические в трёх направлениях структуры с суммарной нулевой кривизной поверхности, которые являются самоподдерживающимися при построении) в программе осуществляется построение в привычном фасеточном представлении (хотя с помощью деревьев неявной геометрии они тоже могут быть сформированы, см. рис. 4). Реализованные в программе TPMS структуры показаны на рис. 4.

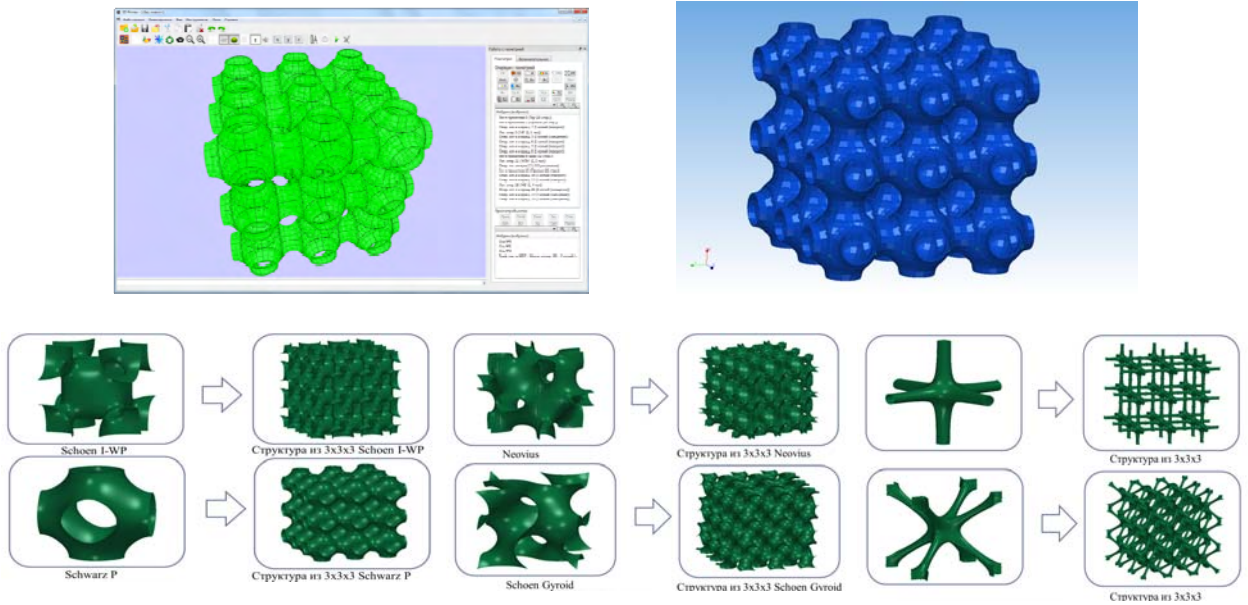


Рис. 4. TPMS структуры (вверху – пример построения с помощью неявной геометрии; внизу – структуры, построение которых реализовано в фасеточном виде)

Примеры, демонстрирующие возможности программы

Создание программы является частью более общих работ по проекту «Разработка атласа...». В данном проекте есть экспериментальная часть по изготовлению различных образцов и деталей по технологии SLM, а также проведение экспериментальных исследований изготовленных образцов и деталей. В 2017 г. для выполнения экспериментальных работ по проекту было подготовлено более 50 видов стандартных образцов для проведения испытаний на растяжение со вписанными решётками (различные типы и параметры решёток) в «шейку» образцов. Размеры образцов соответствовали ГОСТ 1497-84 тип III № 8 ($l_0 = 10 d_0$, $d_0 = 4$ мм, рис. 5).

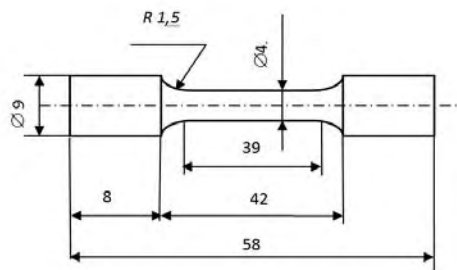


Рис. 5. Стандартный образец детали для исследований на растяжение по ГОСТ 1497-84 тип III № 8 ($l_0 = 10 d_0$, $d_0 = 4$ мм)

На рис. 6 приведен вид компьютерной модели одного из образцов и фотография необработанного образца (не выполнена постобработка) после изготовления.

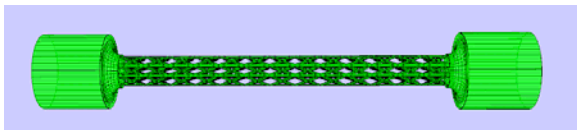


Рис. 6. Компьютерная модель и изготовленный по ней стандартный образец для исследований на растяжение со вписанной решёткой (до постобработки, длина 58 мм)

В 2018 году подготовлены и переданы НИТУ «МИСиС» образцы сложных решёток для проведения испытаний на сжатие. Образцы решёток показаны на рис. 7.

С целью тестирования корректности работы программы и оценки функциональных возможностей, скорости работы, удобства использования, выявления критических недостатков были построены некоторые интересные детали. Ниже в дополнение к деталям, построенным в программе и приведенных в начале статьи на рис. 1 (проиллюстрировано создание деталей разной геометрии, приведены детали со вписанными решётками и с топологической оптимизацией), приведем примеры некоторых сложных деталей на рис. 8, 9.

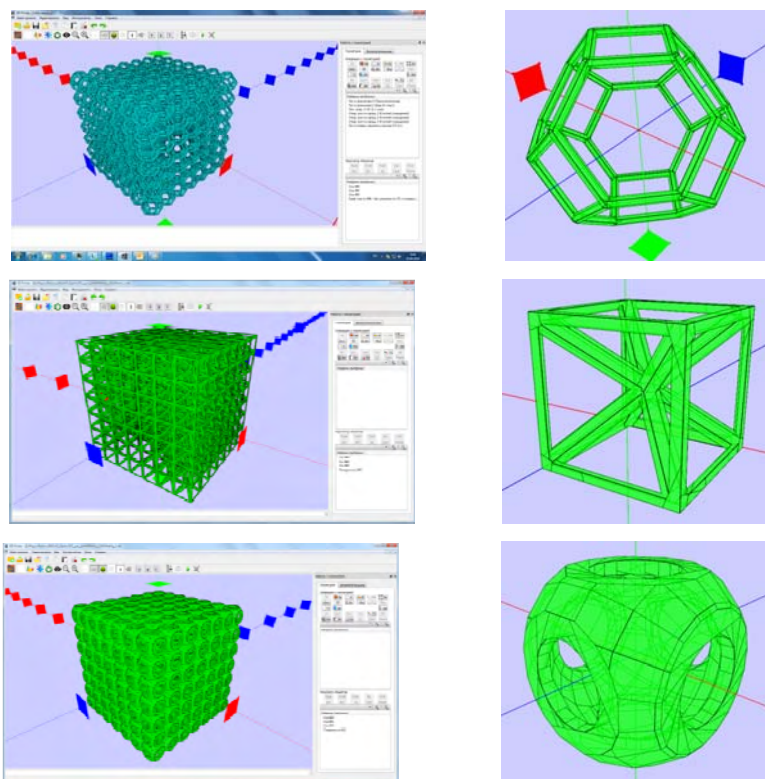


Рис. 7. Образцы решёток, подготовленные для экспериментальных исследований в 2018 году в рамках проекта

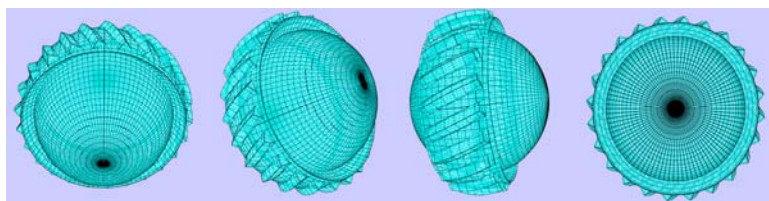


Рис. 8. Создание сложной детали

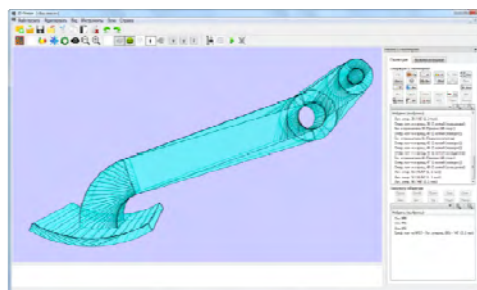


Рис. 9. Создание сложной детали (слева сверху образец из рекламной статьи, справа сверху деталь созданная в программе, а внизу деталь со вписанной решёткой внутри и экспортированная в другую программу)

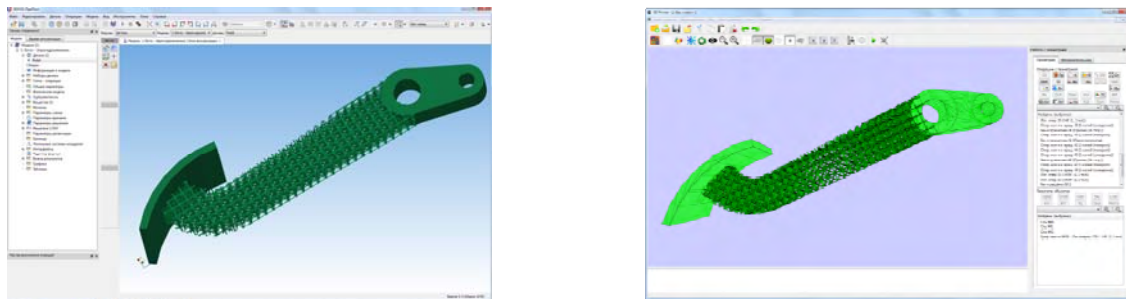


Рис. 9. Окончание

На рис. 9 слева сверху деталь, опубликованная в одной из рекламных статей, а справа сверху деталь, построенная в создаваемой программе, а в нижнем ряду эта же деталь со вписанной внутрь решёткой и экспортированная в другую программу в фасеточном формате STL.

Заключение

В рамках проекта «Разработка атласа типовых форм для топологической оптимизации конструкций, формируемых методом селективного лазерного плавления, и их производственная верификация» в ИТМФ (ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ») с декабря 2016 года ведётся разработка базовой версии специализированной программы для топологической оптимизации деталей с использованием ячеистых (решётчатых) структур для подготовки деталей в аддитивном производстве. В статье приведены сведения о разрабатываемой программе и некоторые примеры, иллюстрирующие её возможности к настоящему времени.

Работа выполняется в рамках соглашения с Министерством образования и науки № 14.578.21.0210 от 03.10.2016 (проект «Разработка атласа типовых форм для топологической оптимизации конструкций, формируемых методом селективного лазерного плавления, и их производственная верификация», шифр 2016-14-579-0009-492) при дополнительном финансировании АО «Наука и инновации» (ГК «Росатом»).

Литература

1. Huang X., Xie Y. M. Evolutionary topology optimization of continuum structures // John Wiley & Sons, UK, 2010.
2. Оганесян П. А., Шевцов С. Н. Оптимизация топологии конструкции в пакете ABAQUS // Теоретические и практические аспекты развития отечественного авиастроения, 2014.
3. Bendsoe M. P. and Sigmund O. Topology Optimization: Theory, Method and Application. Berlin, 2003.
4. Huang X. and Xie Y. M. Bi-directional evolutionary topology optimization of continuum structures with one or multiple materials // Comput. Mech. – 2009.
5. Zhu J. H., Zhang W. H. and Qiu K. P. Bi-directional evolutionary topology optimization using element replaceable method // Comput. Mech. – 2007.
6. Yang X. Y., Xie Y. M., Steven, G. P. and Querin O.M. Bidirectional evolutionary method for stiffness optimization // AIAA Journal. – 1999.
7. Bendsoe M. P. and Sigmund O. Material interpolation schemes in topology optimization // Archive Appl. Mech. – 1999.
8. Rietz A. Sufficiency of a finite exponent in SIMP (power law) methods // Struct. Multidisc. Optim. – 2001.
9. Prager W. Optimality criteria in structural design // Proceeding of the National Academy of Sciences of the United State of America. 1968; 61(3).

10. Querin O. M., Young V., Steven G. P. and Xie Y.M. Computational efficiency and validation of bi-directional evolutionary structural optimization //Comput. Meth. Appl. Mech. Engng. – 2000.
11. Гибсон Я., Розен Д., Стакер Б. Технологии аддитивного производства. – М.: Техносфера, 2016.
12. Никулин Е. А. Компьютерная геометрия и алгоритмы машинной графики. – СПб.: БХВ – Петербург, 2003.

A PROGRAM FOR TOPOLOGICAL OPTIMIZATION OF STRUCTURES USING CELL (MESH) STRUCTURES

A. N. Bykov, V. V. Popov, E. A. Sinitsin, D. Yu. Dyanov, M. V. Medvedkina

Russian Federal Nuclear Center –
All-Russian Research Institute of Experimental Physics, Sarov

Within the project “Development of the Atlas of Charts of Typical Shapes for Topological Optimization of the Structures Formed by Selective Laser Melting and Their Production Verification», which involves National University of Science and Technology «MISIS», Central Scientific-Research Institute of Technology and Mechanical Engineering (CNIITMASH), FSUE RFNC-VNIIEF the software is being developed to prepare computer models of parts in additive production (on the basis of linear static strength problems with different limitations of the target function) and to generate and implement various types of cell (mesh) structures to fill the volume of parts. The paper provides a brief description of the basic version of the software being designed.

Key words: additive technologies, selective laser melting, topological optimization, cell structures, generative design, implicit geometry, TPMS structures.

УДК 519.635.6

ПАКЕТ ПРОГРАММ ЛОГОС. МЕТОДИКА РАСЧЕТА ДВУМЕРНЫХ ЗАДАЧ ГАЗОВОЙ ДИНАМИКИ С УЧЕТОМ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ НА ПОДВИЖНЫХ НЕСТРУКТУРИРОВАННЫХ СЕТКАХ

Е. А. Веселова, Ю. Н. Дерюгин, Д. К. Зеленский

Российский федеральный ядерный центр –
Всероссийский НИИ экспериментальной физики, г. Саров

В данной работе проводится разработка методики расчета двумерных задач газовой динамики с теплопроводностью на подвижных неструктурированных сетках. Математическая модель, используемая для описания процессов распространения ударных волн, основана на уравнениях многокомпонентной газовой динамики и уравнении переноса излучения в диффузионном приближении. Расчетная методика построена на основе использования неструктурированных подвижных сеток, методе расщепления по физическим процессам, явного метода интегрирования уравнений Эй-