

УДК 678.027

## РАСЧЕТ ОРИЕНТАЦИИ КОРОТКИХ ВОЛОКОН НА КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЙ МОДЕЛИ, РЕДУЦИРОВАННОЙ АЛГОРИТМАМИ ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ КОНСТРУКЦИЙ

© 2019 Е.И. Куркин, О.Е. Лукьянов, Е.А. Кишов

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва

Статья поступила в редакцию 10.10.2019

В работе предложена методика расчета литья короткоармированных термопластичных материалов на элементах сетки топологической оптимизации, без использования трехмерных геометрических моделей. Выполнен расчет ориентации армирующих волокон на элементах сетки топологической оптимизации кронштейна. Проведено сопоставление результатов моделирования течения на прямую импортированных сетках с результатами моделирования на синтезируемых по результатам топологической оптимизации трехмерных геометрических моделей. Показано, что разработанная методика позволяет существенно сократить время проектированного расчёта литья силовых конструкций. Представленная методика расчета задач гидродинамики на элементах сетки топологической оптимизации легко формализуема и может быть реализована в пакетном режиме на основе API интерфейсов систем, что дает возможность решать задачи гидродинамики и определения тензора армирующих волокон на внутренних итерациях цикла топологической оптимизации. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта мол\_а\_вед № 18-31-20071.

**Ключевые слова:** композиционный материал, короткие волокна, литье, сетка, топологическая оптимизация.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Термопластичные материалы получили широкое распространение в различных сферах техники и продуктов широкого потребления. Высокая технологичность, низкая стоимость серийного производства и возможность получения деталей с формами практически любой сложности являются основными конкурентными преимуществами изготовления деталей из термопластов методом литья в форму под давлением перед другими материалами с иными технологическими процессами. Химическая промышленность поставляет на рынок целое разнообразие термопластичных материалов с различными механическими и физическими свойствами. Добавление в пластик определённого количества дискретных армирующих элементов позволяет существенное повысить механические характеристики изделия и применять его в силовых конструкциях наряду с металлами или слоистыми полимерными композиционными материалами на основе термореактивного связующего [1]. Особенностью короткоар-

мированных композиционных материалов на основе термопластичных связующих является существенная зависимость их механических характеристик от распределения и ориентации армирующих волокон в связующем, что в свою очередь определяется процессом литья [2].

Силы и моменты, действующие на погруженную в поток твердую частицу определены Джейфри [3]. Фолгар и Тукер [4] обобщили работу Джейфри для определения вероятности ориентации частиц в представительном объеме потока композита. Адвани и Тукер [5] записали закон ориентации частиц в пространстве в тензорном виде, определив тензоры ориентации второго и четвертого порядка через интегралы от взвешенного с учетом вероятности диадного произведения направляющих векторов волокон. Исследования механических характеристик короткоармированных композитов базируются на работах Эшлби, исследовавшего упругость среды, включающей в себя эллипсоидальную частицу [6]. Тандон и Венг на основе теории Эшлби определили характеристики упругости композиционного материала, армированного односторонними короткими волокнами [7]. Таким образом, при разработке изделий из короткоармированных материалов необходимо не только уделять внимание выбору рациональных путей передачи нагрузок, но и учитывать при этом влияние технологического процесса литья на механические характеристики изделия, которые, как правило, различны в разных точках объема и в разных направлениях.

Куркин Евгений Игоревич, кандидат технических наук, доцент кафедры конструкции и проектирования летательных аппаратов. E-mail: eugene.kurkin@mail.ru  
Лукьянов Олег Евгеньевич, кандидат технических наук, ассистент кафедры конструкции и проектирования летательных аппаратов. E-mail: lukyanovoe@mail.ru  
Кишов Евгений Алексеевич, ассистент кафедры конструкции и проектирования летательных аппаратов. E-mail: evgeniy.kishov@ssau.ru

В последние годы существует тенденция всё более частого применения методов топологической оптимизации при проектировании силовых конструкций с целью получения равнопрочных полнонапряжённых структур минимальной массы. Это касается и изделий, получаемых из короткоармированных термопластичных КМ. Отдельной сложностью применения топологической оптимизации при проектировании деталей из подобных материалов является необходимость гидродинамического расчёта методами численного моделирования, которые требуют генерации расчётных сеток по объёму изделия на базе трёхмерных геометрических моделей. Решение такой комплексной задачи напрямую, включающей тесную связь моделей механики твёрдого тела и гидродинамики, является существенно трудоёмкой, так как включает в себя этап подготовки трёхмерной геометрической модели по результатам топологической оптимизации. Известно, что результат топологической оптимизации выдаётся в виде фасеточной геометрии, например, в формате stl. В то время, как численные методы гидродинамики используют расчётные сетки, полученные на основе твердотельных геометрических моделей. В связи с кардинальным отличием твердотельных и фасеточных геометрических моделей исключена их ассоциативная связь. Таким образом, преобразование фасеточной геометрии в твердотельную не может быть как-либо formalизовано и автоматизировано, а потому выполняется целиком вручную. Качество передачи геометрии при этом напрямую зависит от квалификации и творческих предрасположенностей инженера, а требуемое время при этом зависит от сложности формы изделия и может составлять от получаса до нескольких часов или даже нескольких рабочих дней.

Целью работы является сокращение трудоёмкости и временных затрат на подготовительные операции моделирования процесса литья термопластов, а также автоматизация процесса прогнозирования механических характеристик изделия с использованием топологической оптимизации.

## **2. КОНЦЕПЦИЯ «ЕДИНОЙ СЕТКИ» ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧИ РАСЧЕТА ТЕЧЕНИЯ ТЕРМПОЛАСТОВ НА СЕТКЕ ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ**

В работе предлагается новый подход в проектировании изделий из короткоармированных термопластичных материалов, изготавливаемых литьем под давлением. Подход заключается в исключении необходимости конвертирования результатов топологической оптимизации в твердотельную трёхмерную геометрическую модель. Численные математические модели

механики твёрдого тела, лежащие в основе алгоритмов топологической оптимизации, для разрешения систем дифференциальных уравнений используют метод конечных элементов и требуют построения расчётных сеток. Решение уравнений Навье-Стокса при моделировании течения пластика методом конечных объёмов так же требует наличия расчётных сеток, представляющих собой дискретизированный объём геометрической модели детали на ячейки. Предлагаемый подход базируется на использовании единой расчётной сетки как для задачи топологической оптимизации конструкции, так и задачи процесса заполнения формы жидким пластиком под давлением. Процесс решения совместной задачи предполагается выполнять следующим образом:

- выбор рабочей области для проведения топологической оптимизации детали с учётом её геометрических характеристик, граничных условий и нагрузок;
- генерация расчётной сетки по объёму рабочей области с заданным размером и типом ячеек;
- проведение топологической оптимизации детали и удаление из рабочей области ячеек, в которых по результатам расчёта количество материала стремится к нулю;
- выделение элементов сетки топологической оптимизации, удовлетворяющих критерию наличия материала в отдельную сетку, и запись ее в формат, подходящий для моделирования литья термопласта;
- решение задачи течения расплава напрямую на элементах сетки топологической оптимизации - расчет фронта литья, линий спая и ориентации армирующих волокон.

Таким образом, решение задачи течения термопласта происходит с использованием сетки, составленной из оставшихся после топологической оптимизации элементов расчётной сетки, минуя трудоёмкий и затратный этап интерпретации результатов топологической оптимизации в твердотельную модель. Большая вязкость жидких пластиков и исключительно ламинарный характер течения позволяют отказаться от необходимости генерации тонких призматических слоев на стенках каналов для моделирования пристеночных течений, что, собственно, в рамках предлагаемого подхода и не реализуемо. Для реализации концепции «единой сетки» разработаны программы, позволяющие осуществлять экспорт элементов сетки и преобразование типов сетки. Алгоритмы топологической оптимизации реализованы на языке Phyton и APDL в системе ANSYS Workbench, решение задачи гидродинамики с распределением армирующих волокон в системе Autodesk Moldflow.

### 3. РАСЧЕТ ОРИЕНТАЦИИ АРМИРУЮЩИХ ВОЛОКОН НА ЭЛЕМЕНТАХ СЕТКИ ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ КРОНШТЕЙНА

Рассмотрим простейший пример поиска рационального распределения материала в теле гипотетического плоского кронштейна, закрепляемого в двух точках с приложением одной нагрузки, действующей в его плоскости (рис. 1). Расстояние между проушиными закрепления кронштейна составляет 12,5 мм, а расстояние до линии приложения силы – 50 мм. Размеры расчетной области 75 x 50 x 4 мм. Область вокруг проушины с радиусом 12,5 мм всегда содержит материал. Топологическая оптимизация проводится на сетке из тетраэдров. Для топологической оптимизации используется модуль Topology optimization системы ANSYS Workbench. Критерием оптимизации является минимизация энергии деформации при посто-

янном и равном 1760  $\text{мм}^3$  объеме материала, что составляет 12% от объема материала проектной области. Дополнительно наложено условие симметрии относительно плоскости, перпендикулярной вектору приложения силы и проходящей через центр проушины приложения нагрузки.

Результат топологической оптимизации представлен на рис. 2а в виде фасеточной трёхмерной модели. На рис. 2 б представлена твердотельная трёхмерная геометрическая модель, полученная после ручной обработки фасетной геометрии в системе Siemens NX. Отметим, что на качественную обработку такой достаточно несложной геометрии был затрачен почти целый рабочий день специалиста-геометра.

Одной из ключевых задач моделирования течения пластиков является прогноз будущих механических характеристик изделия, определяемых в основном количеством и ориентацией расположенных в объёме армирующих коротких волокон. Распределение ориентации волокон по

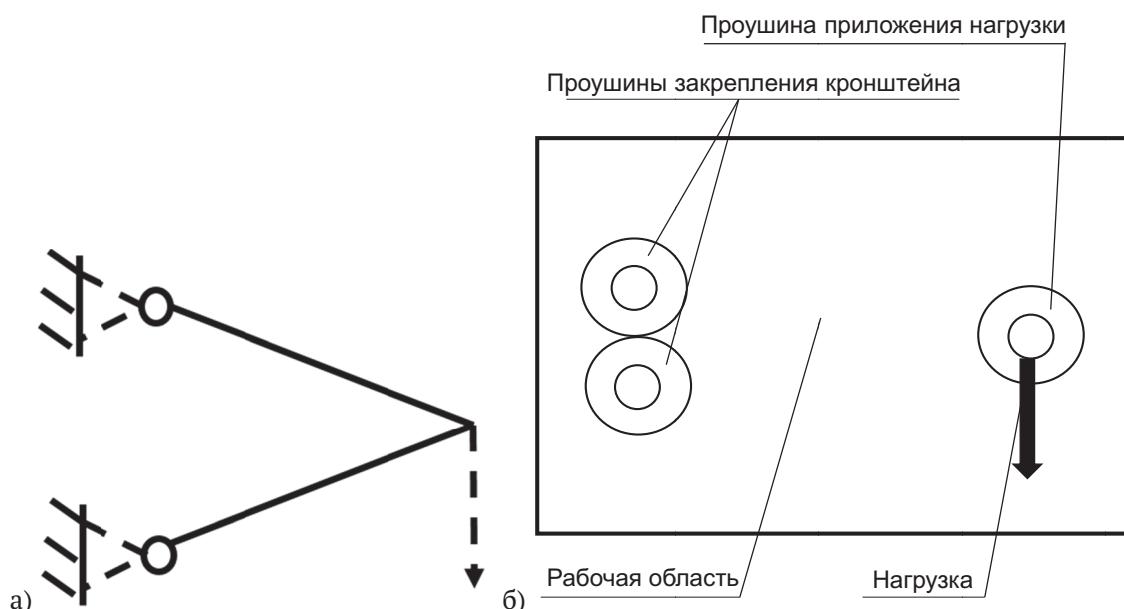


Рис. 1. Постановка задачи топологической оптимизации:  
а) расчётная схема; б) проектная область

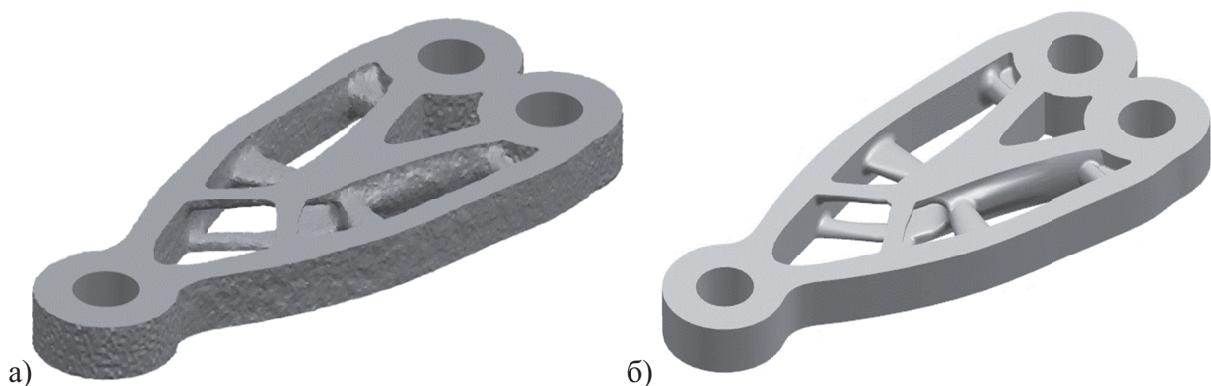


Рис. 2. Результат топологической оптимизации:  
а) фасетная модель в формате stl;  
б) твердотельная модель, построенная по результатам обработки фасетов

объёму тела определяется тензором ориентации армирующих волокон. Покажем работоспособность предлагаемой концепции «единой сетки» на примере сравнения результатов решения задачи распределения ориентации волокон при литье короткоармированного термопласта с использованием промежуточного этапа построения трёхмерной геометрической модели по результатам топологической оптимизации, так и без неё, руководствуясь новым подходом.

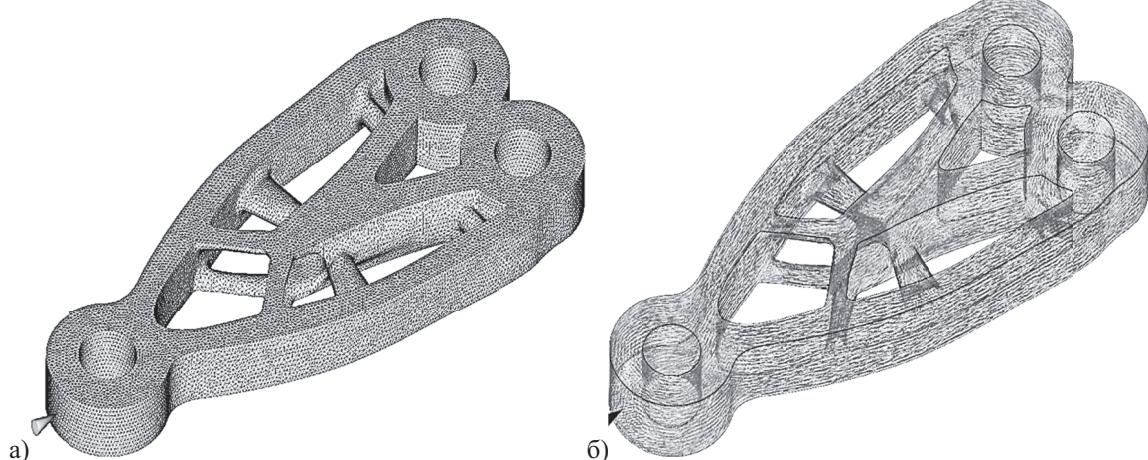
На рисунке 3а представлена расчетная сетка, сгенерированная по объёму твердотельной геометрической модели кронштейна – результата трудоёмкого этапа обработки фасеточной геометрии после топологической оптимизации и место входа литника. Габаритный размер ячейки – 0,35 мм. В результате моделирования литья термопласта получено распределение ориентации волокон по объёму детали (рис. 3б).

На рисунке 4а представлена расчетная сетка для гидродинамической задачи, полученная напрямую как результат фильтрации сетки топологической оптимизации по минимально допустимому значению относительной плотности

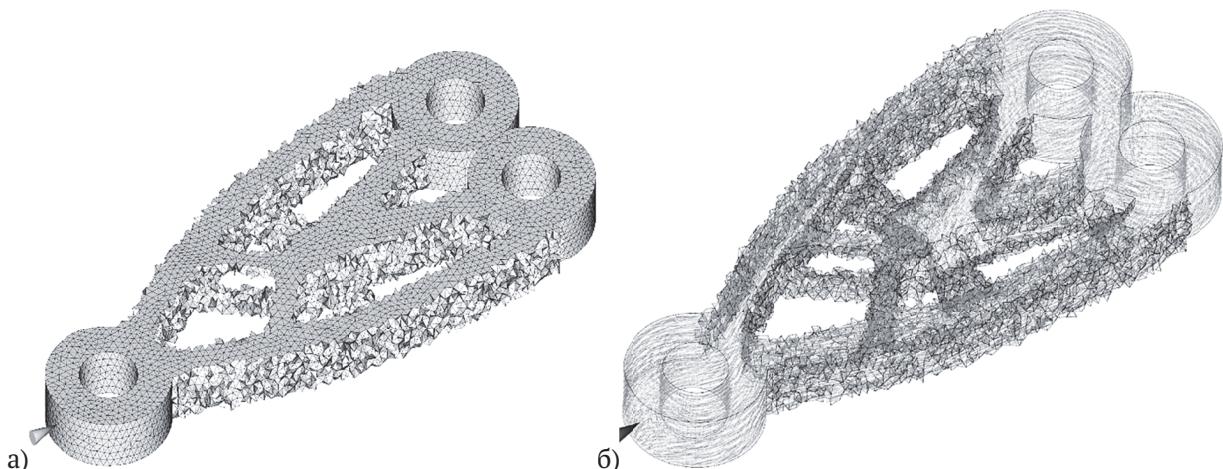
0,4, без создания промежуточной твердотельной геометрической модели. Отобранные как превышающие пороговое значение относительной плотности элементы сетки топологической оптимизации сохранены в ANS формате и переданы в Autodesk Moldflow. На основе данной сетки выполнен гидродинамический расчёт заполнения формы короткоармированным термопластом и получено распределение ориентации волокон (рис. 4б).

Построено решение на двух сетках: более подробной – с размером ячейки 0,35 мм и более грубой – с размером ячейки 0,7 мм с целью оценки сеточной сходимости. Практический интерес представляет собой сравнение результатов, получаемых на основе разных сеток: после геометрической обработки результатов топологической оптимизации и без таковой согласно предложенной концепции «единой сетки».

Проведем количественное сравнение диагональных компонент тензора инерции в трех точках (рис. 5). Анализ графиков распределения диагональных компонент тензора ориентации –  $T_{xx}$ ,  $T_{yy}$  и  $T_{zz}$  по толщине кронштейна (рис. 6)



**Рис. 3.** Расчет литья термопласта на основе трехмерной твердотельной геометрической модели:  
а) расчетная сетка; б) направление армирующих волокон



**Рис. 4.** Расчет литья термопласта на основе элементов сетки топологической оптимизации:  
а) расчетная сетка; б) направление армирующих волокон

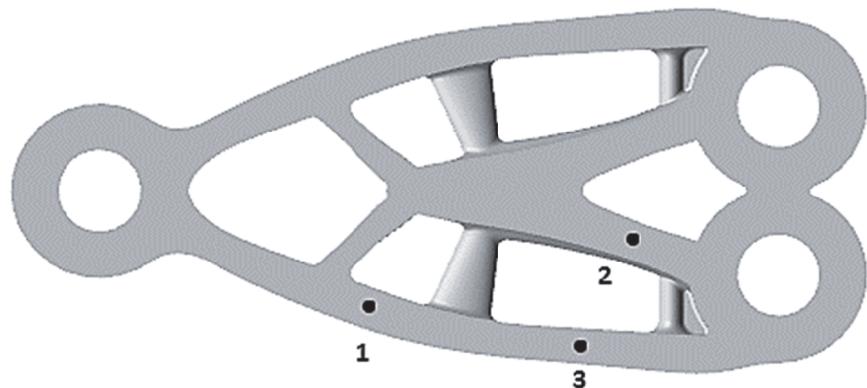


Рис. 5. Расположение точек сравнения компонент тензора ориентации

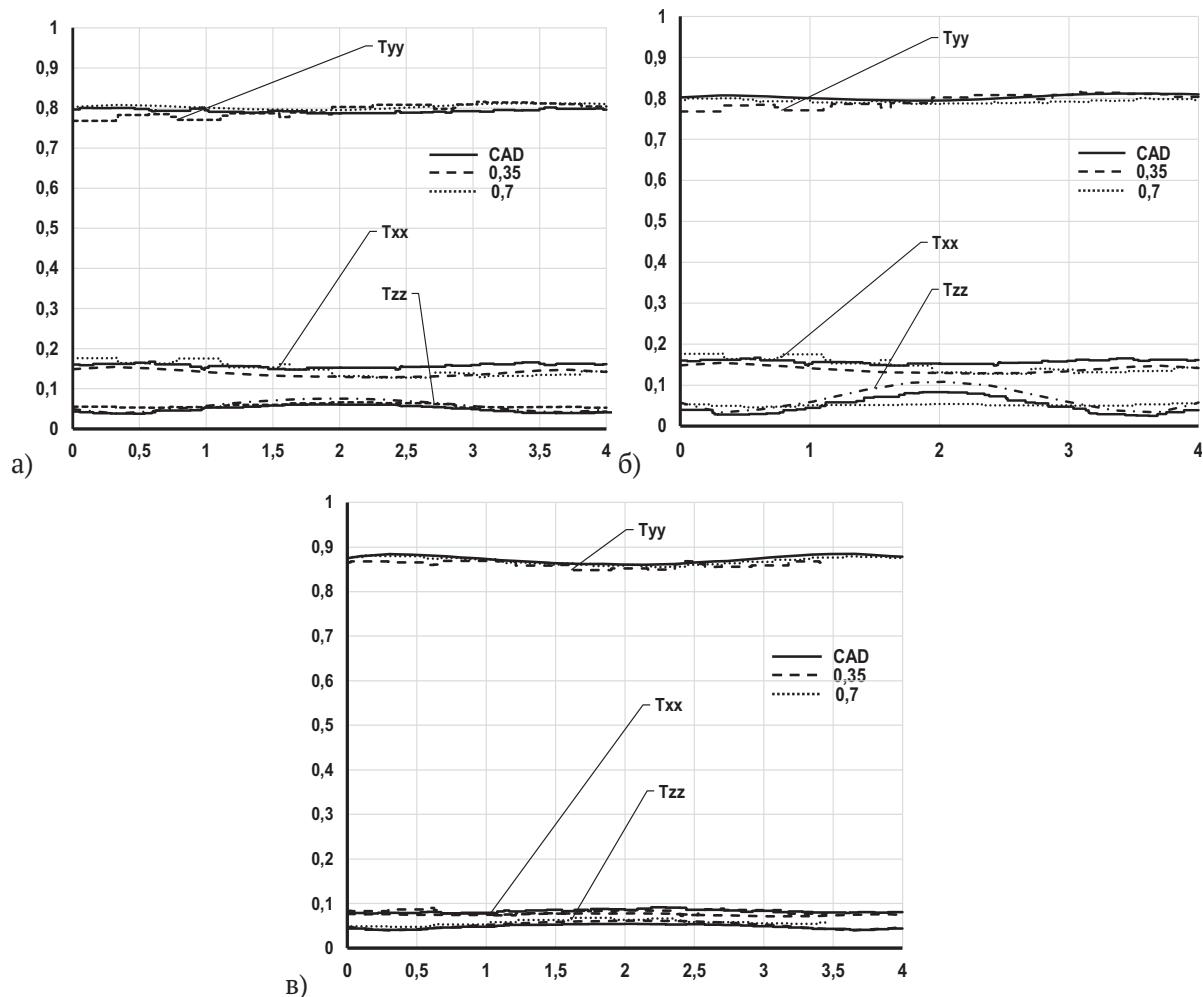


Рис. 6. Сравнение диагональных компонент тензора ориентации по толщине кронштейна, для точек:  
а) 1, б) 2, в) 3

позволяет сделать вывод, что результаты расчёта ориентации волокон на основе «единой сетки» показывают достаточно хорошее соответствие результатам более точного расчёта – расчёта с использованием предварительной геометрической обработки результатов топологической оптимизации. При этом вполне приемлемую точность показывает даже модель с более грубой сеткой.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе показана эффективность предложенной концепции «единой сетки» для прогнозирования механических характеристик изделий из короткоармированных термопластичных КМ, получаемых методом литья под давлением, с использованием топологической

оптимизации при их проектировании. Предложенная концепция позволяет в первую очередь существенно снизить трудоёмкость выполнения задачи, а также сократить временные затраты. На решение задачи традиционным способом понадобилось в общей сложности около полутора рабочих дней трёх специалистов из разных областей знаний: топологической оптимизации, трёхмерного геометрического моделирования, а также гидродинамических расчётов. Концепция «единой сетки» сокращает сроки выполнения рассмотренной задачи до нескольких часов. Достигаемая точность при этом в полной мере удовлетворяет требованиям проектировочного расчёта изделий из короткоармированных КМ.

Представленная концепция расчета задач гидродинамики на элементах сетки топологической оптимизации легко формализуема и может быть реализована в пакетном режиме на основе API интерфейсов систем, что открывает дорогу к расчету задач гидродинамики и определения тензора армирующих волокон на внутренних итерациях цикла топологической оптимизации.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта мол\_а\_вед № 18-31-20071.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мэттьюз Ф., Роллингс Р. Мир материалов и технологий. Композиционные материалы. Механика и технология. - М.: Техносфера, 2004. - 408 с.
2. Tseng H.-C., Chang R.-Y., Hsu C.-H. Numerical predictions of fiber orientation and mechanical properties for injection-molded long-glass-fiber thermoplastic composites, Composites Science and Technology V. 150, 2017. P. 181-186.
3. Jeffery G.B. The motion of ellipsoidal particles immersed in a viscous fluid //Proc. R. Soc. A Vol. 1022, 1922. P. 161-179.
4. Folgar F., Tucker C.L. Orientation behavior of fibres in concentrated suspensions// Journal of Reinforced Plastics and Composites, Vol. 3. Is. 2. 1984, P. 98-119.
5. Advani S.G., Tucker C.L. The Use of Tensors to Describe and Predict Fiber Orientation in Short Fiber Composites // Journal of Rheology. Vol. 31. 1987. P. 751 - 784.
6. Eshelby J.D. The force on an elastic singularity //R. Soc. Lond. A. Vol. 244. 1951. P.87-112.
7. Tandon G.P., Weng G.J. The effect of aspect ratio of inclusions on the elastic properties of unidirectionally aligned composites// Polymer Composites. Vol. 5. Is. 4, 1984. P. 327-333.

## CALCULATION OF SHORT FIBERS ORIENTATION ON A FINITE ELEMENT MODEL REDUCED BY ALGORITHMS FOR TOPOLOGICAL OPTIMIZATION OF STRUCTURES

© 2019 E.I. Kurkin, O.E. Lukyanov, E.A. Kishov

Samara National Research University named after Academician S.P. Korolyov

The paper proposes a methodology for calculating the short-reinforced thermoplastic materials molding on elements of a topological optimization mesh, without the use of three-dimensional geometric models. The orientation of the reinforcing fibers on the mesh elements of the topological bracket optimization is calculated. The results of molding modeling on directly imported mesh are compared with the simulation results on the three-dimensional geometric models synthesized by the results of topological optimization. It is shown that the developed technique allows to significantly reduce the design calculation time for power structures molding. The presented methodology for calculating hydrodynamic problems on elements of topological optimization mesh is easily formalizable and can be implemented in batch mode based on API system interfaces, which makes it possible to solve the problems of hydrodynamics and determining the tensor of fiber orientation at internal iterations of the topological optimization cycle. The reported study was funded by RFBR according to the research project mol\_a\_ved № 18-31-20071.

**Keywords:** composite material, short fibers, molding, mesh, topology optimization.

---

Eugene Kurkin, PhD., Associate Professor of Aircraft Construction and Design Department.

E-mail: eugene.kurkin@mail.ru

Oleg Lukyanov, PhD., Assistant of Aircraft Construction and Design Department. E-mail: lukyanovoe@mail.ru

Eugene Kishov, Assistant of Aircraft Construction and Design Department. E-mail: evgeniy.kishov@ssau.ru