

**В.А. Ковтун, С.Г. Короткевич**  
(Гомельский инженерный институт Республики Беларусь;  
e-mail: korotkevichsergei@mail.ru)

## **ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ ПРИКЛАДНЫХ ПРОГРАММНЫХ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ КОМПОЗИТНЫХ ИЗДЕЛИЙ**

*Представлен обзор программных продуктов ANSYS, COMSOL, ABAQUS, ESI Group, ADINA, ELCUT, Elmer. Анализ проведён с целевым назначением выявления наиболее приемлемых программ для расчёта, проектирования, моделирования и анализа производства композитных материалов. Материал может быть полезен при решении проблем техносферной безопасности.*

*Ключевые слова: композитный материал, программные комплексы, моделирование.*

## **V.A. Kovtyn, S.G. Korotkevich** **REVIEW OF CURRENT APPLICATION PROGRAMS FOR RESEARCH COMPOSITE PRODUCTS**

*There is the review of the package of applied programs ANSYS, COMSOL, ABAQUS, ESI Group, ADINA, ELCUT, Elmer. The purpose of analysis is detection the most acceptable programs for calculation, design, modeling and analysis of production composite products. The material can be helpful in solving the problems of technosphere safety.*

*Key words: composite material, application programs, modeling.*

Статья поступила в редакцию Интернет-журнала 18 января 2016 г.

### **Введение**

Современное производство требует разработки изделий с повышенным стандартом качества, хорошими эксплуатационными характеристиками и более длительным жизненным циклом. В связи с этим в различных отраслях промышленности все чаще используются изделия на основе композитов, которые являются одними из наиболее эффективных и технологичных современных материалов.

Проектируя новый композит, инженер волен задать ему характеристики значительно превосходящие свойства традиционных материалов при выполнении определённой работы в механизме, но уступающие им в каких-либо других аспектах. Это значит, что композитный материал не может быть лучше традиционного материала во всём, для каждого изделия инженер проводит все необходимые расчёты и только потом выбирает оптимум между материалами для производства.

Механическое поведение композиции определяется соотношением свойств армирующих элементов и матрицы, а так же прочностью связей между ними. Характеристики создаваемого изделия, как и его свойства, зависят от выбора исходных компонентов и технологии их совмещения. В результате совмещения армирующих элементов и матрицы образуется композиция обладающая

набором свойств, отражающими не только исходные характеристики его компонентов, но и включающий новые свойства, которыми изолированные компоненты не обладают. Разработка технологии производства композитного изделия связана с большими затратами. На проведение трех испытаний большого композитного изделия обычно уходит 6 недель и требует значительных денежных средств [1].

Одним из способов решения проблемы высоких издержек является применение специализированного программного обеспечения для моделирования всей цепочки производства и эксплуатации изделий, позволяя уйти от физических прототипов и испытаний в процессе разработки проекта. В ходе расчёта прогнозируются все основные дефекты, что даёт специалистам возможность оценивать изменение заготовки в процессе производства. Кроме того, численное моделирование позволяет исследовать различные технологии производства композитных конструкций и, если возникает необходимость, оперативно редактировать параметры. При этом подходе значительно сокращаются время разработки проекта и количество прототипов, что позволяет оценивать данную методику как наиболее экономичную.

Основным содержанием настоящей статьи является анализ программных продуктов с целью выявления наиболее эффективных решений для проведения расчёта, проектирования, моделирования и анализа производства композитных изделий, показать возможности, преимущества и значимость современных подходов реализованных через программные комплексы.

### **Современные программные комплексы для проведения компьютерного моделирования**

В настоящее время существует большое количество программных продуктов по компьютерному моделированию используемые в различных отраслях промышленности. Работа многих программ основана на методе конечных элементов, который является численным методом решения дифференциальных уравнений с частными производными, а также интегральных уравнений, возникающих при решении задач прикладной физики. Метод широко используется для решения задач механики деформируемого твёрдого тела, теплообмена, гидродинамики и электродинамики [2]. Это позволяет решить большой круг инженерных задач.

Все конечно-элементные программы можно условно разбить на несколько групп. К первой группе относятся наиболее сложные и дорогостоящие программные комплексы обладающие большими возможностями (ANSYS, COMSOL). Они служат для моделирования процессов из разной области физических явлений, которые пользуются популярностью у ведущих мировых производителей техники и оборудования и хорошо зарекомендовали себя за высокую точность производимых исследований. Программы другой группы разрабатываются как частные решения для специализированных задач в необходимой исследуемой области, это объясняется стремлением авторов создать более простой и компактный инструмент для работы, что существенно сужает

их возможности. Кроме того имеется большое количество программных модулей для конечно-элементных расчётов, некоторые из них включены в состав более крупных программных продуктов.

Многие компании работают по такому принципу: конструктор разрабатывает новый проект, технолог ограничивает с экономической точки зрения и возможности производства по имеющимся технологиям. В задаче у людей, работающих на специализированном программном обеспечении, в своих расчётах перепроверить конструктора, смоделировать работу изделия с используемыми материалами и предложить доработки, уменьшить уровень напряжений или убрать возникающий концентратор напряжений. Бывают задачи, решаемые компьютерным моделированием, которые помогают полностью переработать новый проект.

Программный комплекс ANSYS уже в течение более чем тридцати лет является одной из наиболее мощных и самой популярной конечно-элементной расчётной системой в мире (более миллиона только легальных пользователей в 117 странах мира, около 98 тыс. коммерческих (промышленных) инсталляций, около 128 тыс. "университетских" (некоммерческих, исследовательских) инсталляций). В число клиентов компании ANSYS входят практически все крупнейшие промышленные корпорации мира: BMW, Boeing, Caterpillar, Daimler-Chrysler, FIAT, Ford, General Electric, Lockheed Martin, Mitsubishi, Shell, Volkswagen-Audi и др., а также результаты исследований применяются на многих ведущих предприятиях промышленности Российской Федерации. Компания первой реализовала решение связанных многодисциплинарных задач, включила собственный язык программирования APDL. Особенностью программы является файловая совместимость всей линейки продуктов ANSYS для всех поддерживаемых платформ. Универсальность программы позволяет использовать одну и ту же модель для решения таких связанных задач, как прочность при тепловом нагружении, влияние магнитных полей на прочность конструкции, тепломассоперенос в электромагнитном поле. Возможности постпроцессинга ANSYS позволяют детально изучить поведение изделия при нагрузке. Пользователь может просматривать результаты как в общем, для всей конструкции, так и детально – на уровне отдельного слоя. Отличительной особенностью ANSYS Composite PrepPost является наличие уникальных алгоритмов для моделирования складкообразования (драпировки), что позволяет учитывать в расчёте ориентацию волокон в слоях, даже в случае сложной геометрической формы изделия [3]. Основные недостатки: высокая стоимость, сложность в освоении.

COMSOL – это основанная на передовых численных методах расчёта универсальная программная платформа для компьютерного моделирования различных физических задач (рис. 1). Более 30 дополнительных продуктов позволяют расширять платформу моделирования, используя специальные физические интерфейсы и инструменты для электрических, механических, гидродинамических и химических систем. Имеет большие возможности в изучении материалов при напряжённо-деформированном состоянии. Дополнительные интер-

фейсы обеспечивают использование моделирования в пакете COMSOL при технических вычислениях, САПР и автоматизации проектирования электронных приборов. Данный пакет, обладает почти такими же возможностями, как и пакет ANSYS, особенностью является то, что COMSOL практически является инструментом пакета MATLAB и работает под его управлением, то есть все возможности программирования, доступные в MATLAB, могут быть использованы и в COMSOL, например, при обработке результатов расчёта [4]. Основные недостатки: высокая стоимость, отсутствие литературы на русском языке, сложность в освоении.

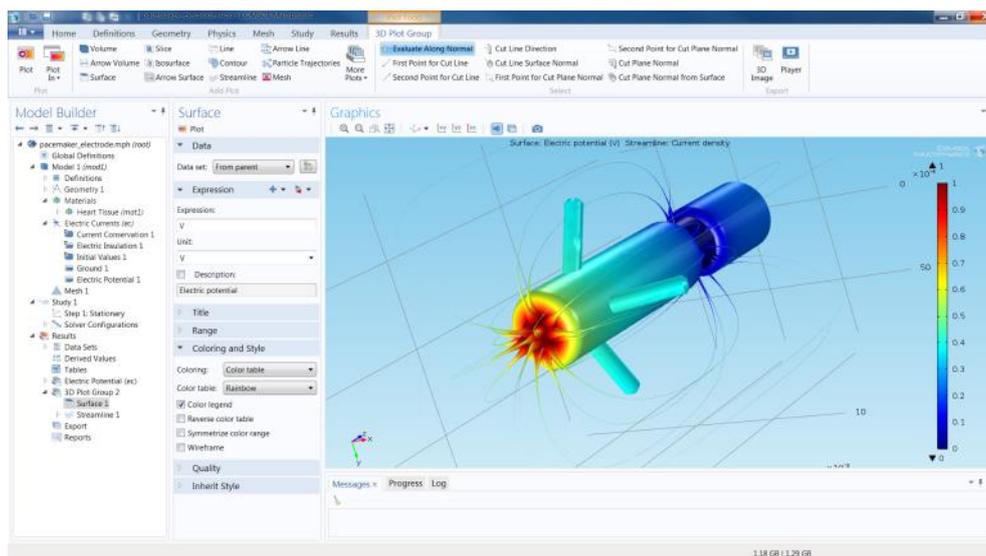


Рис. 1. Интерфейс программного комплекса COMSOL

ABAQUS – универсальная система общего назначения, предназначенная как для проведения разнообразного инженерного многодисциплинарного анализа, так и для научно-исследовательских и учебных целей в самых разных сферах деятельности, в числе которых крупные авто и авиа заводы, производители электроники. С помощью комплекса ABAQUS можно решать такие задачи, как расчёт прочности турбомашин и проектирование двигательных установок, анализировать работу шасси и трансмиссий, рассчитывать сварные соединения, проводить анализ аварийных столкновений (краш-тесты), моделировать сверхпластичные деформации, литье металлов, выполнять расчёты композиционных структур, учитывать контактное взаимодействие большого числа тел, сейсмические воздействия, взрывные воздействия, проводить расчёты надёжности ядерных реакторов, анализ прочности электронных компонентов и т.д. Программный комплекс ABAQUS изначально был ориентирован на решение самых сложных и ответственных задач, с учётом всех видов нелинейностей, а также на проведение многодисциплинарного статического и динамического анализа в рамках единого алгоритма. Такая концепция выгодно отличает ABAQUS от других программ подобного уровня (программный комплекс ANSYS для анализа сильно нелинейных и быстротекущих процессов использу-

ет стороннюю программу LS-DYNA), что позволяет с помощью ABAQUS в рамках единого подхода решать многоцелевые задачи, сочетая преимущества явной и неявной схем конечно-элементного анализа и их комбинацию [5]. Основные недостатки: ABAQUS практически неизвестен в России, а его широчайшие возможности знакомы только узкому кругу специалистов, мало обучающей информации на русском языке, сложность в освоении.

Компания ESI Group (Франция) – один из ведущих разработчиков и поставщиков программного обеспечения для численного моделирования процессов производства композитных изделий, их поведения в ходе эксплуатации и проведения испытаний в различных условиях. "Делкам-Урал" является официальным представителем ESI Group в России. Основными партнёрами в России являются ОАО "КАМАЗ-Металлургия", ОАО "Авиадвигатель", Организация ЗАО "ЦНИИ "ТрансЭлектроПрибор", Челябинский механический завод. Существуют три подхода к моделированию, реализованные в программах 2D, 2,5D и 3D. Они позволяют минимизировать временные затраты на моделирование и ускорять верификацию моделей. При варианте 2,5D расчёт производится на поверхностных моделях, которые представляют собой срединные поверхности композиционных элементов, при этом оболочкам присваиваются эквивалентные свойства данных частей. Возможность наблюдения объёмных эффектов по толщине обеспечивает подход 2D. Он моделирует поперечное сечение изделия и позволяет учитывать свойства каждого композитного слоя или групп слоев при их большом количестве. Последний подход состоит в моделировании полной объёмной композиционной конструкции. В этом случае расчёт становится наиболее точным – прогнозируются все объёмные эффекты, однако он является и наиболее затратным по времени. При всех трёх подходах моделирование можно производить с учётом разной проницаемости волокон, вызванной их искажением в результате операции предварительной подготовки изделия [6]. Одной из важнейших функций программы является определение дефектов пропитки связующим веществом (пористости, утолщений и т.д.). Предлагаемые "Делкам-Урал" программные решения компании ESI Group позволяют осуществить полный цикл производства детали – от операций изготовления основы композита, предварительной формовки, пропитки связующим веществом до испытаний готового изделия при помощи моделирования на компьютере. Основные недостатки: узкая специфика моделируемых задач, сложность в освоении.

ADINA (Automatic Dynamic Incremental Nonlinear Analysis) – универсальная программа, работающая на основе метода конечных элементов, используемая для инженерных линейных и нелинейных расчётов. Позволяет решать задачи теплопереноса в твёрдых телах и конструкциях; рассчитывать течения сжимаемой и несжимаемой жидкости, использующую конечно-объёмную и конечно-элементную дискретизацию; проводить мультифизические и электростатические симуляции; программный модуль ТМС предназначен для решения связанных термопрочностных задач, когда термические явления влияют на прочностные, и наоборот. Пре- и постпроцессорный модуль, дающий воз-

возможность создавать и редактировать геометрические и конечно-элементные модели и осуществлять визуализацию результатов расчёта. [7]. Недостатки: небольшое количество учебных материалов на русском языке, малоизвестен.

ELCUT – это комплекс программ для инженерного моделирования электромагнитных, тепловых и механических задач методом конечных элементов. Основные плюсы данного программного комплекса: дружественный пользовательский интерфейс, простота описания моделей, широкие аналитические возможности комплекса и высокая степень автоматизации всех операций. Редактор модели позволяет достаточно быстро описать создать модель исследуемых объектов. Кроме того, фрагменты модели можно импортировать из системы AutoCAD или других систем проектирования. Можно вычислять различные интегральные величины на заданных пользователем линиях, поверхностях или объёмах. Недостатки: двумерная геометрическая модель, используется один вид конечного элемента, треугольник (нет выбора между типами конечных элементов), виды анализа задач механики и теплопередачи ограничены по функциональности и являются вспомогательными [8].

Elmer – проект, рассчитанный на решение задач из твёрдого тела, акустики, электромагнетизма, квантовой механики; задачи описываются в виде легко читаемых текстовых файлов, есть неплохой графический интерфейс, поддерживает распараллеливание по MPI. Недостатки: отсутствие учебных материалов на русском языке [9].

Проведя анализ и изучив существующие наиболее распространённые и используемые в компьютерном моделировании для проведения расчётов программные комплексы, можно сделать вывод, что рабочих качественных продуктов включающих в себя препроцессор для построения различной геометрии и сетки, междисциплинарных модулей, постпроцессор для вывода результатов, не так уж и много. Практически все программы не поддерживают русский язык, что существенно осложняет их изучение. Из проведенного обзора можно сделать вывод о том, что по своим возможностям программный продукт Ansys обладает большей функциональностью. Основными преимуществами, также необходимыми для проведения в дальнейшем собственных исследований, являются большой выбор анализа решаемых физических задач, возможность совмещённого анализа исследований, таких как деформация и электропроводность, препроцессор для построения различной геометрии и сетки с выбором типа конечного элемента.

### **Возможности использования программного комплекса Ansys**

Высокая точность вычислительных исследований, постоянно обновляющееся программное обеспечение, разнообразие решаемых и моделируемых процессов позволило программному комплексу Ansys получить распространение у большого числа компаний в разных сферах индустрии со всего мира. Получаемые результаты постоянно используются в проведении своих научных исследованиях учреждениями высшего образования и различными научно-исследовательскими центрами многих стран.

В настоящее время в Гомельском инженерном институте МЧС Республики Беларусь ведутся исследования по повышению эксплуатационных ресурсов и расширению нагрузочно-скоростных режимов работы пожарной аварийно-спасательной техники в узлах трения композитными покрытиями на основе наноструктурированной порошковой матрицы. Свойства композиционных материалов с металлической матрицей обусловлены влиянием ряда факторов: количества и типа матрицы и наполнителя; вида и характера распределения наполнителя в матрице; конструкции композита и технологии его получения; учёта внешних воздействий [10].

Проводятся исследования для случаев формирования покрытий толщиной 300 мкм насыпного слоя из медного порошка с включением различных компонентов. Постановка и решение задачи в программном комплексе ANSYS для проведения совмещённого расчёта теплового и напряжённо-деформированного состояния включает в себя несколько этапов:

Создание геометрии. Применение программы ANSYS Design Modeler позволяет создавать геометрию расчётной модели (возможны подходы реализованные в 2D- и 3D-формате), также возможен импорт из сторонних CAD редакторов позволяющих сохранить её в наиболее популярных форматах.

Выбор типа анализа из предложенных в Analysis Systems. На этом этапе прикладываются нагрузки и задаются начальные и граничные условия для проведения расчёта при помощи вкладок разделов Details, задаются контактные параметры, а также определяются материалы модели и их свойства. Для нашей задачи подходят модули Electric (рис. 2) – воздействие электричества, Steady-State Thermal (рис. 3) – получение значений температуры путём задания условий конвекции и передачи тепла в окружающую среду, Static Structural (рис. 4) – воздействие приложенных сил для получения требуемой деформации, при этом, для получения связанной задачи, результаты расчётов из каждого модуля импортируются и учитываются в другом.

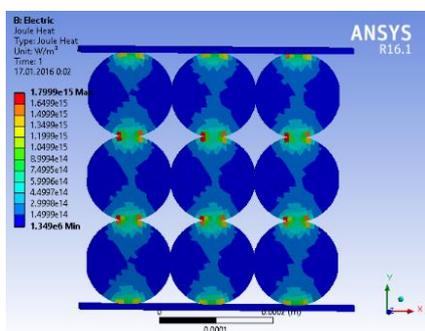


Рис. 2. Прохождение электрического тока

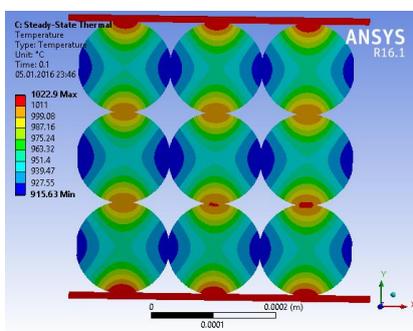


Рис. 3. Распределение температуры

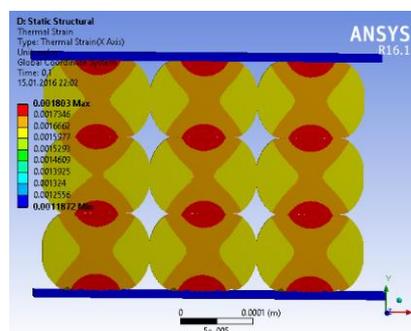


Рис. 4. Распределение тепловых полей под воздействием нагрузки

Построение и настройка конечно-элементной сетки. Сеточный генератор ANSYS позволяет создать оптимальную, в рамках решаемой задачи, расчётную сетку, что является трудоёмким процессом, итог которого напрямую влияет на точность моделирования и время, затраченное на решение. Сеточным генератором ANSYS возможно создание четырёх типов элементов: гексаэдральные, тетраэдральные, клиновые (призматические) и пирамидальные различной степени детализации и адаптации.

Запуск решения, просмотр и анализ результатов. Для настройки и задания параметров вычислений, а также для наблюдения и управления процессом решения имеется графический интерфейс пользователя Solver Manager, который предоставляет возможность визуализировать различные расчётные величины.

Предложенный модельно-теоретический подход позволяет разрабатывать компьютерные модели зон контактного взаимодействия, описывающие тепловое и напряжённо-деформированное состояния материалов при приложении внешних воздействий (плотность электрического тока и усилие сжатие электродов) в условиях нестационарной теплопередачи, отличающиеся от существующих возможностью учёта влияния времени электронного спекания, контактного взаимодействия поверхностей и особенности структуры частиц порошкового слоя на формирование температуры полей, деформации компонентов, распределении температуры, термо- и механические напряжения.

### **Заключение**

В данном обзоре представлены основные известные и часто используемые программные комплексы для проведения компьютерного моделирования и расчётов. Сравнительный анализ показал, что наиболее многофункциональной по своим возможностям является программный комплекс Ansys. Также показаны возможности данного программного продукта для решения связанных задач в изучении свойств композитных покрытий. Крупнейшие в мире производители электроники, техники, различного оборудования используют в своём производстве результаты, полученные через моделирование в программном комплексе Ansys, что говорит о точности получаемых результатов и разнообразии возможностей для пользователя. Ежегодно в г. Москва проводится международная конференция пользователей данной программы, спонсором проведения которой является компания NVIDIA – один из крупнейших в мире разработчиков графических ускорителей и процессоров, а также наборов системной логики, что также демонстрирует высокий уровень качества проведения исследований.

Таким образом, производство композитных изделий при помощи старого метода проб и ошибок сегодня приводит к очень большим финансовым и, что особенно критично в условиях динамично развивающегося рынка, временным затратам. В настоящее время очень важно получать бездефектные изделия, удовлетворяющие самым жёстким требованиям. При производстве высокоответственных изделий важным требованием является соблюдение точных допусков изделия. Программные продукты дают возможность пользователю реализовать данную задачу, при этом позволяя максимально сократить количество дорогостоящих опытных образцов.

### Литература

1. **Котов В.А.** Моделирование производства композиционных материалов – вызов времени // Наука и производство: Перспективные материалы для авиакосмической промышленности. 2013. № 2. С. 22-24.
2. **Елусеев К.В., Зиновьева Т.В.** Вычислительный практикум в современных САЕ-системах // Компьютерное моделирование. СПб.: СПбПУ, 2008. С. 36-54.
3. **Ansys Theoretical Manual.** <http://www.cadfem.ru>.
4. **Сайт** компании разработчика пакета COMSOL Multiphysics. <http://www.comsol.com>.
5. **ABAQUS** – многоцелевой конечно-элементный комплекс для инженерного анализа. <http://sapr.ru>.
6. **ESI.** <http://www.esi-russia.ru>.
7. **Компьютерное** моделирование композитных изделий. <http://www.delcam-ural.ru>.
8. **ADINA.** <http://www.cadfem-cis.ru/products/adina/simulation>.
9. **Falkovich S., Lyulin S., Nazarychev V., Larin S., Gurtovenko A., Lukasheva N., Lyulin A.** Influence of the electrostatic interactions on the thermophysical properties of polyimides // Molecular-dynamics simulations. Part B: Polymer Physics. 2014. 52 (9). Pp. 640-646.
10. **Пасовец В.Н., Ковтун В.А., Плескачевский Ю.М.** Получение, свойства и безопасность композитов на основе порошковых металлов и наноструктур углерода. Гомель: БелГУТ, 2011. 200 с.