

## ОБЗОР СОВРЕМЕННОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В ПРОЦЕССЕ ИХ ОБРАБОТКИ

Д.В. Кононова

[kononovadv@bk.ru](mailto:kononovadv@bk.ru)

SPIN-код: 8467-1034

Ф.А. Сабуров

[fyodor.saburov.01@gmail.com](mailto:fyodor.saburov.01@gmail.com)

SPIN-код: 7069-2088

Д.А. Киприянов

[danila9949@mail.ru](mailto:danila9949@mail.ru)

С.В. Медведев

[sergo.ranes1@mail.ru](mailto:sergo.ranes1@mail.ru)

*МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация*

В работе показаны ключевые возможности и функции различных доступных программных пакетов для работы с композиционными материалами. Исследование охватывает широкий спектр инструментов, включая специализированные системы автоматизированного проектирования, расчетные модули и платформы для моделирования. Особое внимание уделено удобству работы, точности расчетов и интеграции с другими инженерными программами. Результаты демонстрируют, что современные пакеты позволяют эффективно проектировать композиты, оптимизировать параметры материалов и анализировать их поведение при различных нагрузках. Рассмотрены вопросы стоимости, поддержки разработчиков и обучения пользователей. Выявлены сильные и слабые стороны каждого решения, что поможет специалистам выбрать оптимальный инструмент для своих задач.

**Ключевые слова:** композитные материалы, программный продукт, метод конечных элементов, матрица, гетерогенные свойства, нелинейные свойства

**Введение.** Изготовление деталей аэрокосмической техники связано с необходимостью обеспечения высокой прочности изделий при сравнительно небольшом весе. Применение композиционных материалов (КМ) позволяет снизить материалоемкость конструкций, а также уменьшается количество оснастки [1, 2].

Однако работа с композиционными материалами требует специализированного подхода из-за анизотропных свойств. Программное обеспечение (ПО) для КМ представляет собой набор вычислительных инструментов, предназначенных для проектирования, моделирования и анализа композитных конструкций. Эти программы учитывают уникальные свойства: анизотропию, гетерогенность и сложное поведение при нагружении.

По мере развития технологий создания и формообразования КМ ПО для них продолжает развиваться [3]. Ключевые тенденции включают в себя ис-

пользование искусственного интеллекта для автоматизации и повышения точности анализа, а также разработку новых алгоритмов.

Цель данной работы — провести сравнительный анализ для принятия обоснованного решения при выборе ПО для работы с КМ.

**Возможности программного обеспечения при работе с полимерными композиционными материалами.** На сегодняшний день при разработке технологических систем чаще используется методика инновационного проектирования. Это связано с ростом функциональности CAD/CAE-инструментов. Данные средства реализуют анализ с помощью параметрической трехмерной модели, работу которой симулируют с помощью CAE-пакета. По результатам проводится оптимизация конструкции путем корректировки исходной CAD-модели [4].

Программное обеспечение предоставляет широкий спектр возможностей, охватывающих все аспекты: моделирование и оптимизацию конструкции.

Ряд особенностей КМ [5], которые необходимо учитывать в работе с ПО:

- гетерогенные свойства;
- нелинейные свойства;
- мгновенный характер разрушения;
- анизотропия свойств;
- зависимость микроструктуры от выбранной технологии изготовления изделия.

Программное обеспечение позволяет моделировать микроструктуры КМ: распределение волокон, матрицы и пор. Оно также применяется для анализа нагрузок, что используется при решении ряда задач, в том числе оптимизации конструкции.

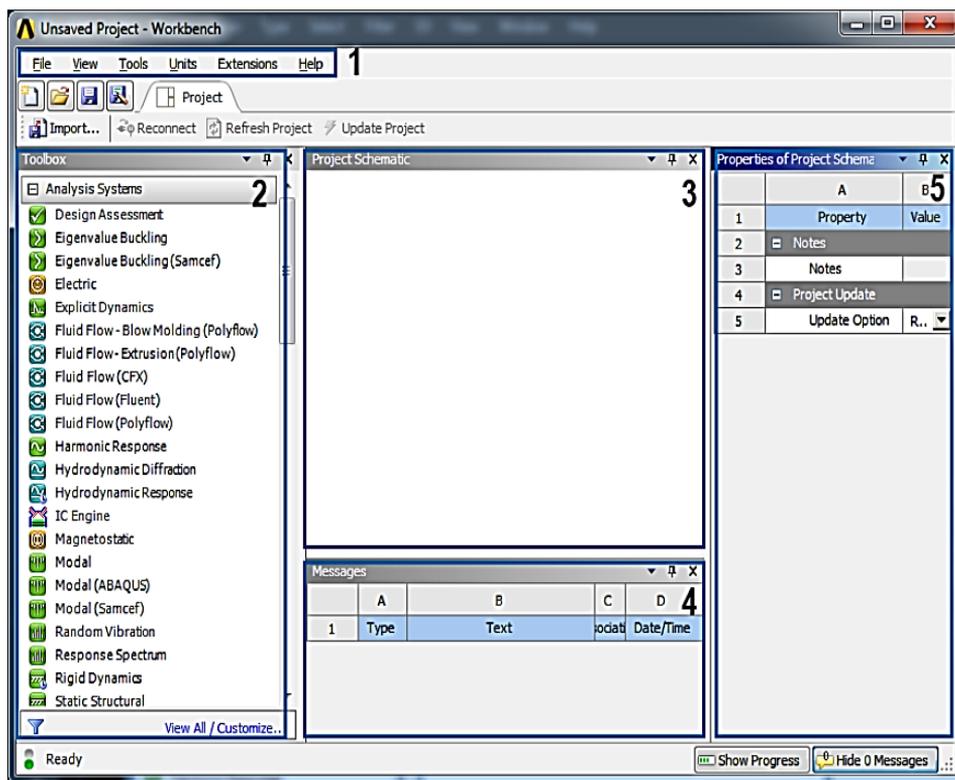
Помимо основных возможностей представленные пакеты включают в себя:

- моделирование процессов изготовления композитов;
- управление большими объемами данных;
- интеграцию с инструментами систем автоматизированного проектирования.

**Программное обеспечение для исследования свойств полимерных композиционных материалов в процессе их обработки.** *Ansys Composite* [6] — универсальная программная система конечно-элементного (КЭ) анализа в области решения линейных и нелинейных, стационарных и нестационарных пространственных задач.

Начиная с 10-й версии в ANSYS добавлена программная среда Workbench — универсальный инструмент для структурирования и контроля решения задач, рабочее окно которой представлено на рис. 1. В ее состав вхо-

дит несколько простых в освоении инструментов для создания геометрии, а также сетки КЭ. Workbench позволяет создавать сетку КЭ и связывать, например, тепловой и структурный анализ в рамках одного проекта [4].



**Рис. 1.** Рабочее окно Workbench:

- 1 — главное меню; 2 — панель инструментов проекта; 3 — основное окно проекта;
- 4 — окно сообщений; 5 — окно свойств выбранного объекта

Ansys Composite PrePost — это программное решение в области проектирования технологий изготовления изделий из КМ. Программный комплекс позволяет создавать модели деталей с характеристиками, точно соответствующими свойствам КМ, уменьшать количество производственных дефектов [7].

При разработке модели композитной конструкции определяются свойства материала слоев, тип наполнителя. Инструментарий Ansys Composite PrePost позволяет определить направление «ноль градусов» для конструкции из слоистого композита. Это особенно актуально для изделий сложной фор-

мы, конструкций большой кривизны и конструкций с сильным изменением ориентации волокон. Это дает возможность предсказывать образование складок и проводить коррекцию углов армирования.

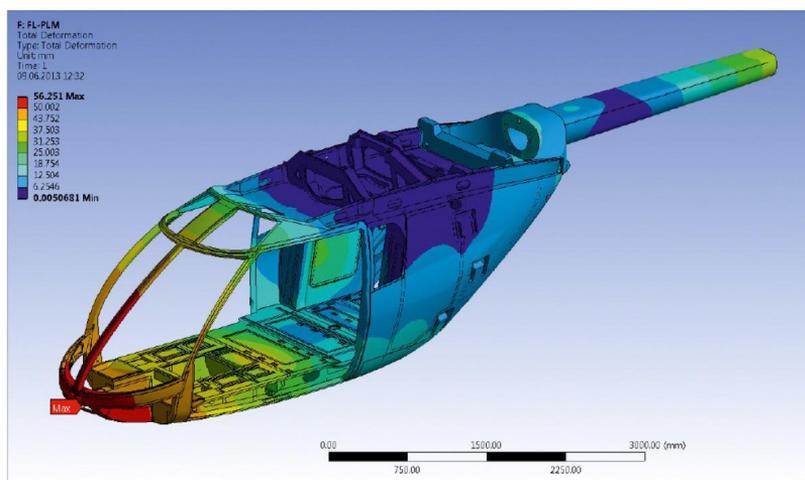
Ansys предлагает большую библиотеку КЭ, которые могут использоваться для создания моделей: одномерные (балки и трубопроводы), двумерные (оболочки и элементы типа solid-shell) и трехмерные элементы. Для изделий сложной формы, Composite PrepPost предоставляет возможность автоматически генерировать трехмерные КЭ-модели. Это преобразование может осуществляться путем вытягивания плоских элементов вдоль направления нормали к формообразующей поверхности или вдоль другого направления, соответствующего конкретной геометрии.

Может быть смоделировано расслоение в результате приложения сил на основе значений межслоевых касательных напряжений.

Критерии максимальных напряжений Хашина и Пака более информативны [8].

Данные технологии позволяют моделировать на уровне микромеханики композитов. Для моделирования роста трещин используется технология VCCT (Virtual Crack Closure Technique).

Для анализа результатов решения в модуле реализована возможность комплексной оценки модели. В результате выводятся данные по самым проблемным зонам конструкции. Пример расчета напряженно-деформированного состояния композитного фюзеляжа вертолета представлен на рис. 2.



**Рис. 2.** Расчет напряженно-деформированного состояния композитного фюзеляжа вертолета в программном комплексе Ansys

Решения Ansys позволяют оптимизировать технологические процессы, гарантируя, что изделие отвечает производственным требованиям.

**FiberSIM** [9] — комплексное программное решение для проектирования и производства изделий из современных полимерных композиционных материалов (ПКМ) Данный программный комплекс может быть полностью интегрирован в основные 3D-CAD-системы [5].

Основные модули:

- FiberSIM Pro, FiberSIM Elite — модули для разработки документации изделий из ПКМ;
- FiberSIM Laser Projection — модуль для поддержки процесса производства изделий из ПКМ методом ручной укладки;
- FiberSIM Flat Pattern Export позволяет автоматически создавать файлы данных разверток для экспорта;
- FiberSIM Documentation — решение для автоматизированного создания точной 3D- и 2D-конструкторской и технологической документации.

FiberSIM 2012 снижает степень неопределенности поведения композитных деталей под нагрузками путем описания, проверки требуемой ориентации волокон на протяжении процесса разработки изделия. Новая система координат дает возможность моделировать укладку материалов с ориентацией вдоль траектории.

В пакете FiberSIM 2010 были впервые представлены функции моделирования технологических процессов для многослойных материалов. Эти функции легли в основу FiberSIM 2012. В версии 2012 г. представлен новый функционал обмена описаниями мультиаксиальных тканей и наполнителей. Этот функционал предоставляет возможность взаимодействия между конструкторами с учетом важнейших компонентов на протяжении всего цикла разработки изделия. Для точного расчета необходимо учитывать специфические характеристики мультиаксиальных тканей и наполнителей.

Самой сложной и трудоемкой задачей в процессе конструирования является работа со спецификациями сбега между зонами постоянной толщины. В FiberSIM 2012 представлена функция визуального редактора профиля сбег для работы с такими спецификациями.

FiberSIM можно использовать отдельно или в качестве ключевого компонента пакета ПО и услуг Aerosuite, который подходит для решения задач от стадии предварительного проектирования до этапа контроля качества. Aerosuite также включает в себя ПО Syncrofit для проектирования и изготовления сложных узлов.

**Порядок работы.** Выбирают материал слоев, определяют общие параметры пакета слоев — ламината. Изделие может состоять из нескольких ла-

минатов. В зависимости от сложности изделия определяют метод формирования слоев:

- послойный метод для простых деталей;
- для сложных изделий используются методы зонного или структурного проектирования. При проектировании подобных изделий часто применяют заполнители — сотовые, пенные и др.

В FiberSIM формирование таких элементов осуществляется с помощью диалогового окна, изображенного на рис. 3.

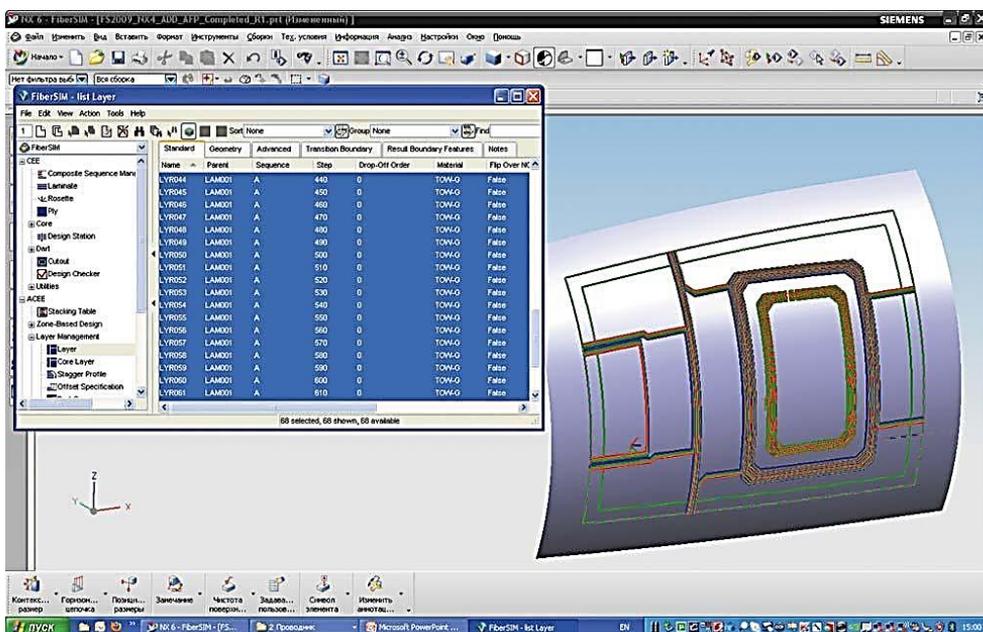


Рис. 3. Диалоговое окно для назначения геометрических параметров в FiberSIM

В процессе выкладки задается последовательность слоев для получения сбалансированного по характеристикам изделия. В зависимости от метода производства изделия осуществляется послойный анализ материала. По результатам определяются технологические способы устранения проблем. Состав слоев приводится в соответствие с шириной используемого материала. В зависимости от производственных условий могут быть введены технологические припуски.

**PAM-COMPOSITES** [10] — программное решение компании ESI Group в области проектирования технологий изготовления изделий из композици-

онных материалов. Данное ПО представляет собой единую линейку программных продуктов:

- Visual-Environment: единая система препроцессоров, предназначенная для постановок различных задач;
- PAM-FORM: моделирование задач по формовке композитов;
- PAM-RTM: моделирование задач пропитки изделий;
- PAM-DISTORTION: основное решение для моделирования процессов коробления в композиционном изделии.

PAM-COMPOSITES обладает широким набором решений для представления:

- вакуумной инфузии;
- Light RTM, Heavy RTM, C-RTM процессов;
- автоклавного формование;
- печного отверждения;
- термоформовки;
- SMC формования;
- намотки.

Данный программный комплекс представляет собой единую среду для расчета и анализа задач. Для расчета технологии требуется наличие твердотельной CAD-модели, набор свойств и граничные условия [11].

Сходимость результатов напрямую зависит от точности начальных данных. Поэтому особое внимание следует уделить точному определению входных характеристик материалов.

При моделировании рекомендуется:

- идентификация (определение свойств материалов);
- верификация (подтверждение соответствия определенных ранее свойств материалов);
- проведение и анализ расчетов.

За последние годы в PAM-COMPOSITE было реализовано множество новых возможностей. Нововведением является добавление возможности расчета компенсации оснастки в ходе полимеризации КМ через диалоговое окно, представленное на рис. 4.

В модуле PAM-Distortion были добавлены новые возможности по закреплению изделия и снято ограничение на количество элементов. Была добавлена 19 тканей различных марок, 2 типа волокон и эпоксидное связующее.

**Программный комплекс Digimat** [12] обеспечивает возможность моделировать широкий спектр многофазных материалов и применить комплексный подход в проектировании композитных конструкций.

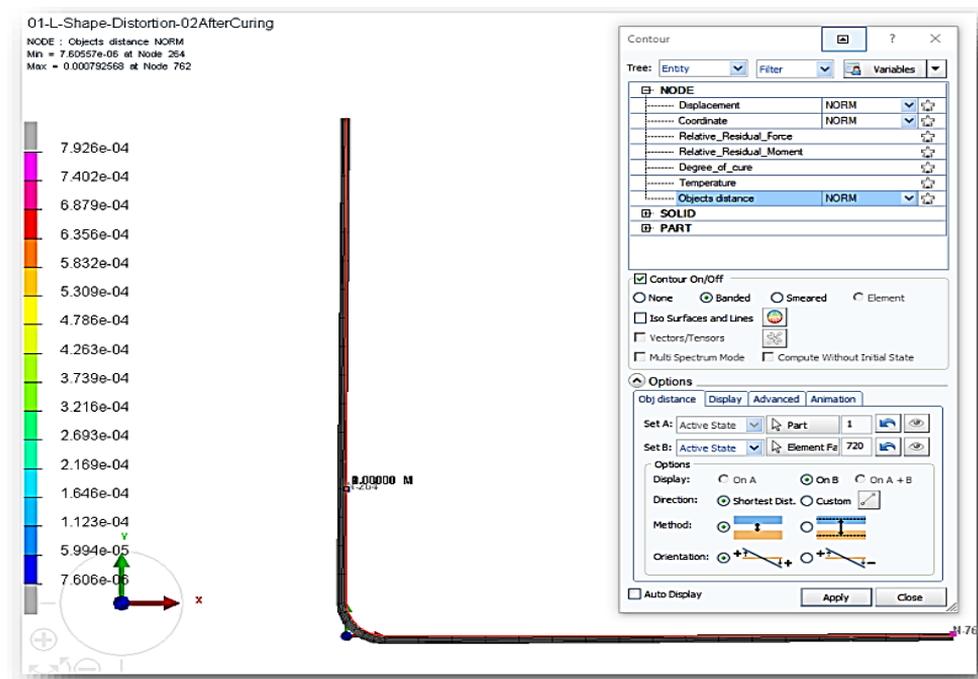


Рис. 4. Диалоговое окно для расчета компенсации осадки в ходе полимеризации композита в PAM-COMPOSITES

Реализованный в Digimat микроуровневый подход делает его востребованным всеми специалистами, связанными с КМ или композитными конструкциями. Это могут быть разработчики КМ, материаловеды или технологи. Это позволяет активно применять Digimat в наукоемких отраслях промышленности: авиационной, ракетно-космической, электронной и др.

Digimat имеет модульную структуру и состоит из девяти модулей: Digimat-MF, -FE, -MX, -MAP, -CAE, -RP, -HC, -VA, -AM. Все модули взаимосвязаны и логически дополняют друг друга.

Идея многоуровневого моделирования для гетерогенных материалов заключается в определении влияния свойств отдельных фаз и микроструктуры материала на микроуровне на характеристики КМ на макроуровне.

Для решения этой задачи используется подход представительного элемента объема (ПЭО), который представляет собой связь между микро- и макроуровнем. Представительный элемент объема — это некоторая элементарная ячейка КМ, описывающая его характеристики:

- на микроуровне ПЭО достаточно большой, чтобы содержать в себе требуемое количество включений;

– на макроуровне ПЭО намного меньше значимой части исследуемой конструкции.

Влияние микроструктуры в ПЭО на отклик материала определяется методами гомогенизации. Основная задача этих методов — найти эквивалентный гомогенный материал, который имеет эффективные характеристики на макроуровне и гетерогенные характеристики на микроуровне.

В настоящее время существуют различные математические методы для решения этой задачи. Digimat предоставляет возможность проводить гомогенизацию двумя методами: методом срединного поля или методом конечных элементов (МКЭ).

При гомогенизации методом срединного поля создается математическая модель композиционного материала, чувствительная к микроструктуре и свойствам отдельных фаз. После с помощью полуаналитических методов происходит гомогенизация и получение характеристик КМ. Данный метод позволяет быстро построить математическую модель материала и определить характеристики на макроуровне.

При использовании метода гомогенизации с помощью МКЭ, строится полная КЭ-модель ПЭО и проводится ее расчет для определения требуемых характеристик материала.

Модули Digimat-MF и Digimat-FE предназначены для определения механических, тепловых и электрических характеристик КМ.

Еще одной важной возможностью модуля является проведение обратного инжиниринга, когда математическая модель материала может быть быстро откалибрована по результатам натуральных испытаний. Исходными данными являются модель материала на микроуровне и результаты натуральных испытаний материала.

В настоящее время модуль поддерживает передачу данных о микроструктуре из широкого спектра программного обеспечения, которое моделирует изготовления композитных конструкций различными технологиями.

Digimat-CAE является в первую очередь инструментом специалиста по прочности/жесткости композитных конструкций. Модуль позволяет провести связанный КЭ-расчет конструкции с нелинейной анизотропной моделью материала.

Digimat-CAE объединяет вместе:

- модель материала на микроуровне;
- микроструктуру;
- КЭ модель для структурного анализа.

При анализе с использованием Digimat-CAE стандартная модель материала из КЭ-решателя заменяется моделью материала Digimat, которая учиты-

вает уникальную микроструктуру в каждой точке конструкции. В ходе решения задачи, КЭ-решатель обменивается информацией с Digimat. Обработка и визуализация результатов расчета выполняются с помощью стандартных инструментов пост-процессорной обработки для используемого в расчете КЭ-решателя.

Модуль Digimat-RP представляет собой интегрированное решение для проектирования и расчета конструкций из армированных пластин.

Модуль Digimat-NC является одним из интегрированных в Digimat решений и предназначен для проектирования и проведения виртуальных испытаний образцов из сэндвич-панелей.

Digimat-VA, позволяет провести «виртуальные испытания» требуемой серии образцов из слоистого композиционного материала

Применение Digimat-VA обеспечивает получение требуемых расчетных характеристик слоистого КМ как до начала, так и параллельно с программой длительных натурных испытаний образцов.

Digimat-AM позволяет пользователю промоделировать процесс 3D-печати, определить коробление и остаточные напряжения, возникающие в детали в зависимости от технологических параметров процесса.

**SIMULIA Abaqus** [13] — программный продукт для конечно-элементного анализа (FEA), который может использоваться для моделирования процессов резания и иных видов механической обработки композитных материалов.

Главной особенностью SIMULIA Abaqus является использование модулей, которые содержат определенный набор действий, близкий по значению и необходимый для построения программой КЭ-модели и проведения операций с ней.

Именно в программное обеспечение SIMULIA Abaqus был внедрен Расширенный Метод Конечных Элементов (XFEM), что дает возможность провести расчет роста трещин по произвольным путям, не зависящим от границ элементов.

Например, XFEM в сочетании с другими возможностями решения используется в аэрокосмической отрасли при анализе долговечности авиационных композитных конструкций.

Пакет модулей в КЭ-комплексе SIMULIA Abaqus предлагает мощные комплексные решения не только для работы с текущими задачами, но и для устранения сложных инженерных проблем в самых разных отраслях.

В КЭ-комплексе мирового уровня — SIMULIA Abaqus в базовой лицензии уже собраны модули пре/постпроцессора, неявного и явного решателя. Различные настраиваемые расширения и плагины для SIMULIA Abaqus,

предлагающие эффективность для конкретных потребностей промышленного моделирования будет являться только плюсом для эффективного решения задач.

**Заключение.** Программное обеспечение играет решающую роль в формообразовании и анализе композитных конструкций. Оно предоставляет инженерам инструменты для моделирования, оптимизации и анализа поведения данных структур под нагрузкой.

Существует множество различных программных пакетов, каждый из которых имеет свои уникальные возможности и преимущества. Пакеты Ansys Composite, FiberSIM, PAM-COMPOSITES предоставляют возможность моделировать процесс производства КМ, что позволяет на ранних этапах вносить необходимые изменения в процесс производства КМ. Интеграция программных пакетов с САД системами поддерживается в FiberSIM и Digimat. Выбор оптимального ПО зависит от конкретных требований к исследованию КМ.

## Литература

- [1] *Жаропрочные сплавы для промышленных газовых турбин.* URL: <https://viam.ru/review/3800> (дата обращения 10.04.2025).
- [2] *Использование композиционных пластмасс в народном хозяйстве.* URL: <https://studentopedia.ru/lib/ispolzovanie-kompozicionnyh-plastmass-v-narodnom-hozyaystve-f28.html> (дата обращения 10.04.2025).
- [3] *Моделирование конструкций из композитных материалов.* URL: <https://compositeworld.ru/articles/tech/id60686b92b3134a0012c16989> (дата обращения 10.04.2025).
- [4] Калашников А.М. *Моделирование и анализ объектов с контролируемой микроструктурой композитных конструкционных материалов: практикум. В 2 ч.* Омск, Изд-во ОмГТУ, 2021.
- [5] Скворцов Ю.В. *Механика композитных материалов.* Самара, Самарский университет, 2013.
- [6] *Ansys Composite Cure Simulation.* URL: <https://www.ansys.com/resource-center/white-paper/ansys-composite-cure-simulation> (дата обращения 10.04.2025).
- [7] Хитрых Д.П. *Современные методы проектирования конструкций из композиционных материалов.* URL: <https://compositeworld.ru/articles/tech/id60686b92b3134a0012c16989> (дата обращения 10.04.2025).
- [8] Муйземнек Ф.Ю. *Механика деформирования и разрушения полимерных слоистых композиционных материалов.* Пенза, Изд-во ПГУ, 2017.
- [9] *Fibersim software composites design.* URL: <https://plm.sw.siemens.com/en-US/nx/products/fibersim-composites/> (accessed 10.04.2025).

- [10] *PAM-composites*. URL: <https://www.esi-group.com/products/pam-composites/> (accessed 10.04.2025).
- [11] *PAM-COMPOSITE. Моделирование изделий из композитов*. URL: <https://compositescluster.ru/products/po-i-tsifrovye-resheniya/pam-composite-po-modelirovanie-izdeliy-iz-kompozitov/> (дата обращения 09.04.2025).
- [12] *Digimat*. URL: <https://en.digimat.it/> (accessed 10.04.2025).
- [13] *SIMULIA Abaqus*. URL: <https://www.simuleon.com/simulia-abaqus/> (accessed 10.04.2025).

*Поступила в редакцию 20.05.2025*

**Кононова Дарья Витальевна** — студентка кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

**Сабуров Федор Алексеевич** — студент кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

**Киприянов Данила Андреевич** — студент кафедры «Ракетные двигатели», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

**Медведев Сергей Вячеславович** — студент кафедры «Ракетные двигатели», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

**Научный руководитель** — Васильева Татьяна Владимировна, старший преподаватель кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

**Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:**

Кононова Д.В., Сабуров Ф.А., Киприянов Д.А., Медведев С.В. Обзор современного программного обеспечения для исследования свойств полимерных композиционных материалов в процессе их обработки. *Политехнический молодежный журнал*, 2025, № 06 (101). URL: <https://ptsj.bmstu.ru/catalog/arse/airdev/1081.html>

## A REVIEW OF MODERN SOFTWARE FOR STUDYING THE PROPERTIES OF POLYMER COMPOSITE MATERIALS DURING THEIR PROCESSING

**D.V. Kononova**

kononovadv@bk.ru

SPIN-code: 8467-1034

**F.A. Saburov**

fyodor.saburov.01@gmail.com

SPIN-code: 7069-2088

**D.A. Kipriyanov**

danila9949@mail.ru

**S.V. Medvedev**

sergo.ranes1@mail.ru

*Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation*

This paper presented the key capabilities and functions of various available software packages for working with composite materials. The study covered a wide range of tools, including specialized CAD systems, computational modules, and modeling platforms. Particular attention is paid to ease of use, calculation accuracy, and integration with other engineering programs. The results demonstrate that modern packages enable efficient composite design, optimization of material parameters, and analysis of their behavior under various loads. Furthermore, cost, developer support, and user training are discussed. The strengths and weaknesses of each solution are identified, helping specialists select the optimal tool for their needs.

**Keywords:** composite materials, software, finite element method, matrix, heterogeneous properties, nonlinear properties

*Received 20.05.2025*

**Kononova D.V.** — Student of Department of Rocket and Space Engineering, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

**Saburov F.A.** — Student of Department of Rocket and Space Engineering, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

**Kipriyanov D.A.** — Student of Department of Rocket Engines, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

**Medvedev S.V.** — Student of Department of Rocket Engines, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

**Scientific advisor** — Vasilyeva T.V., Senior Lecturer of Department of Rocket and Space Engineering, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

### **Please cite this article in English as:**

Kononova D.V., Saburov F.A., Kipriyanov D.A., Medvedev S.V. A review of modern software for studying the properties of polymer composite materials during their processing. *Politekhnikheskiy molodezhnyy zhurnal*, 2025, no. 06 (101). URL: <https://ptsj.bmstu.ru/catalog/arise/airdev/1081.html>