

**ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
ПРИ ВНЕДРЕНИИ НОВЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**© 2016 Н. А. Демкович¹, И. А. Волков², Е. И. Яблочников¹¹ Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет
информационных технологий, механики и оптики² ООО «Би Питрон СП», г. Санкт-Петербург

Статья поступила в редакцию 13.10.2016

В статье приводятся результаты анализа подходов к проектированию изделий, изготавливаемых с помощью новых производственных технологий. Рассматриваются технологии литья под давлением термопластичных композиционных материалов, автоматизированной выкладки лент и препрегов с использованием роботизированных комплексов, аддитивные технологии. Показано, что для рассмотренных технологий характерно наличие взаимосвязи между функциональными свойствами изделия и параметрами технологического процесса, выраженной в формировании микроструктуры материала изделия в ходе его изготовления. Для каждой технологии сформулированы связанные задачи проектирования и технологической подготовки производства, решение которых требует комплексного применения систем численного моделирования и инженерного анализа на всех этапах разработки изделия. Приведены сведения о возможностях современных систем компьютерного моделирования по решению поставленных задач.

Ключевые слова: моделирование численное, литье под давлением, полимерные композиционные материалы, аддитивные технологии, автоматизированная выкладка лент препрегов

ВВЕДЕНИЕ

Одним из наиболее важных факторов развития российских промышленных предприятий является повышение конкурентоспособности их продукции на внутреннем и внешнем рынке. Конкурентное преимущество может быть достигнуто за счет снижения издержек на проектирование и производство продукции, либо путем разработки и вывода на рынок изделий, превосходящих существующие аналоги по функциональным и другим характеристикам. Таким образом, разработка и внедрение новых производственных технологий становится одним из условий получения конкурентоспособных изделий. Развитие технологий идет параллельно с процессом разработки материалов с управляемыми свойствами, позволяющими получать изделия, максимально полно отвечающие заданным техническим требованиям. Кроме того, появление новых технологий требует пересмотра существующих подходов к проектированию, так как ведет к изменению критериев оценки технологичности конструкции изделия.

В последние годы наибольшее развитие получили технологии переработки композиционных материалов на основе термопластичных свя-

зующих и аддитивные технологии. Кроме того, постоянно совершенствуются технологии литья пластмасс под давлением: разрабатываются и внедряются технологии литья полимерных деталей с закладными элементами, литья с газом, многокомпонентного литья, микроинжекционного литья и др.

Одной из наиболее заметных тенденций является постоянный рост объемов применения композиционных материалов для изготовления изделий высокотехнологичных отраслей, таких как самолето- и вертолетостроение, двигателестроение, приборостроение, автомобилестроение и др. При этом наблюдается интерес к внедрению технологий, ранее мало использовавшихся при производстве ответственных изделий авиационной техники. Например, в 2015 году компанией Airbus Helicopters (США) был разработан и запущен в серийное производство фитинг для навеса двери Airbus A350-900, выполненный из полиэфирэфиркетона (ПЭЭК), армированного углеродным волокном. Изделие изготавливается *литьем под давлением*. Общий вид фитинга показан на рис. 1. Сообщается, что переход к использованию композиционного материала и технологии литья под давлением позволил сократить издержки производства и уменьшить массу изделия на 40 % [1]. Об аналогичных результатах [2] сообщает компания Denroy Plastics Ltd, производитель авиационных компонентов для Bombardier.

Технологии *автоматизированной выкладки лент (ATL) и волокон (AFP)* являются одним из основных методов получения крупногабаритных деталей авиационной техники из композици-

Демкович Наталия Александровна, аспирант.

E-mail: dna@beepitron.com

Волков Игорь Александрович, заместитель генерального директора – коммерческий директор.

E-mail: via@beepitron.com

Яблочников Евгений Иванович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой технологии приборостроения. E-mail: eugeny@beepitron.com



Рис. 1. Фитинг для навеса двери Airbus A350-900 [1]

онных материалов. Использование многокоординатных промышленных роботов позволяет получать изделия сложной формы, в частности, элементы силовых конструкций авиационных и космических аппаратов. В настоящее время данная технология развивается в направлении интеграции устройств позиционирования и размерной обработки изделий [3, 4, 5]. Технологии ATL и AFP можно отнести к аддитивным технологиям, так как предполагают последовательное послойное добавление материала.

Применение *аддитивных технологий* при производстве изделий авиационной техники до недавнего времени ограничивалось изготовлением моделей и прототипов на ранних этапах разработки для грубой оценки аэродинамических характеристик [6]. С развитием технологии селективного лазерного спекания (SLS) стало возможным получение конечных изделий авиационной техники [7, 8] из металлических порошков.

Для рассмотренных технологий характерно наличие тесной взаимосвязи между свойствами конечного изделия и параметрами технологического процесса его изготовления. С другой стороны, в ходе проектирования конструкции изделия необходимо учитывать как анизотропию свойств материала, возникающую под действием технологических факторов, так и технологические ограничения, связанные с выбранным методом производства. Распространенным способом оценки взаимного влияния конструкции изделия, технологии его изготовления и свойств материала является применение компьютерного моделирования на всех этапах разработки нового изделия, включая конструирование изделия, выбор технологии его изготовления, выбор состава и микроструктуры материала, проверочный расчет конструкции на статическую и динамическую прочность.

Целью работы является разработка и исследование современных методик проектирования изделий с учетом взаимного влияния конструкторских и технологических факторов. В статье

приводятся общие сведения по применению систем моделирования на различных этапах жизненного цикла изделия для решения связанных задач проектирования и технологической подготовки производства (ТПП).

ЛИТЬЕ ПОД ДАВЛЕНИЕМ ТЕРМОПЛАСТИЧНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Литье под давлением является распространенным способом изготовления деталей из полимерных материалов. Для этой технологии характерна высокая производительность технологического процесса, поэтому она находит широкое применение в условиях крупносерийного и массового производства. Кроме того, современные исследования [9] показывают, что при условии применения принципов групповой технологии, использования унифицированных переналаживаемых литевых форм и формообразующих деталей, изготовленных с помощью аддитивных технологий, технологии литья под давлением могут эффективно применяться и в условиях мелкосерийного производства.

Важной особенностью технологии является возможность модификации свойств полимерного материала за счет введения в его состав дисперсного или волокнистого наполнителя. Изделия из полимерных композиционных материалов (ПКМ), изготовленные методом литья под давлением, обладают достаточным ресурсом по прочности для работы под действием статических и динамических механических нагрузок. Благодаря удачному сочетанию прочностных характеристик и сравнительно малой массы изделия из ПКМ находят широкое применение в различных отраслях промышленности.

При изготовлении деталей методом литья под давлением наблюдается влияние параметров технологического процесса на функциональные свойства готового изделия, которое выражается в формировании микроструктуры материала в ходе его изготовления. Под микроструктурой материала в данном случае понимается размер, форма, ориентация и концентрация армирующих частиц или волокон в каждой точке изделия. Как следствие, для определения технологических режимов, обеспечивающих получение требуемых функциональных свойств, и для описания свойств композиционного материала и изделия в целом требуется решить задачу моделирования процессов формирования локальной микроструктуры материала.

Для решения этой задачи используются системы инженерного анализа и компьютерного моделирования (например, Moldex3D (CoreTech System, Тайвань)), расчетные модули которых основываются на модели Фольгара-Такера, RSC (reduced strain closure) модели и других подходах. В качестве исходных данных для имитационного моделирования выступают сведения о массовой или объемной доли армирующих компонентов в материале, термомеханические свойства материала армирующих компонентов, реологиче-

ские и термомеханические свойства материала связующего, технологические режимы литья под давлением (температура расплава, давление выдержки), конфигурация литниковой системы и положение мест впрыска [10]. Результатом моделирования являются данные об ориентации армирующих волокон в каждой точке изделия, распределении температур в конструкции, величине остаточных напряжений, наличии пор в материале, наличии и положении зон спая.

Полученные результаты используются для расчета усредненных характеристик композиционного материала и построения нелинейной модели материала, достоверно описывающей его поведение в каждой точке изделия в зависимости от параметров микроструктуры материала в этой точке. Расчет производится с использованием специального программного обеспечения, предназначенного для решения задач микромеханики композиционных материалов (Digimat (e-Xsteam engineering, Бельгия)). Затем полученная модель материала используется в системах структурного анализа (MSC Nastran (MSC Software, США), ANSYS (ANSYS, США), SIMULIA (Dassault Systemes, Франция) и др.) для расчета исследуемой конструкции на статическую, динамическую или усталостную прочность [11].

В работах зарубежных авторов [12, 13] приводятся результаты расчетов прочности изделий из композиционных материалов, полученные с использованием описанного подхода, а также результаты натурных испытаний. Показана хорошая сходимость результатов моделирования и эксперимента, что свидетельствует об эффективности описанного метода.

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ВКЛАДКА ЛЕНТ (ATL) С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РОБОТИЗИРОВАННЫХ КОМПЛЕКСОВ

Метод автоматизированной вкладки лент (ATL) с использованием роботизированных комплексов применяется для изготовления изделий из полимерных композиционных материалов со слоистой структурой и заданной ориентацией волокон в слое.

Для выбора состава композиционного материала, разработки схемы армирования и анализа межслойных и межфазных взаимодействий используются методы численного определения локальных свойств гетерогенного материала на основе данных о свойствах отдельных его компонентов. Эти методы реализованы в программном комплексе Digimat (e-Xstream engineering, Бельгия), в модулях Digimat-FE (Finite Element) и Digimat-MF (Mean Field).

При выполнении проверочных расчетов прочности конструкции, изготавливаемой методом автоматизированной вкладки лент, следует учитывать анизотропные свойства, возникающую при размещении слоев композитной ленты. Моделирование процесса вкладки материала и анализ локальной микроструктуры материала реализуется с помощью специализированных модулей CAE-систем и автономных систем модели-

рования, таких как Fibersim (Siemens, Германия), Patran Laminate Modeler (MSC Software, США) и др.

На основе рекомендованных режимов переработки используемого материала подбираются параметры технологического процесса: сила натяжения ленты, температура в области контакта ленты с оснасткой, усилие прижима ленты к оснастке и др. Кроме того, существенное влияние на качество изделия могут оказывать и другие параметры технологической системы, такие как теплопроводность материала оснастки, на которую производится выкладка ленты материала. Следовательно, на этапе ТПП возникает необходимость в моделировании тепловых процессов, характерных для технологии ATL, что может быть реализовано в программных комплексах MSC. Nastran (MSC Software, США), ANSYS (ANSYS, США), SIMULIA (Dassault Systemes, Франция) и др.

В зависимости от требуемой схемы армирования формируется траектория выкладки ленты на оснастку, которая определяет траекторию движения выкладочной головки и ее ориентацию относительно оснастки. Проектирование траектории обработки производится с использованием программного обеспечения, поставляемого разработчиком промышленного робота-манипулятора, или с использованием универсальных систем программирования промышленного оборудования DELMIA 3DEXPERIENCE (Dassault Systemes, Франция) и др.

Таким образом, на всех этапах проектирования и ТПП используются системы численного моделирования, что позволяет решать связанные задачи функционального, конструкторского и технологического проектирования.

АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Аддитивные технологии характеризуются рядом преимуществ по сравнению с традиционными методами получения деталей: возможностью изготовления изделий произвольно сложной формы, эффективностью использования дорогого сырья, отсутствием необходимости разработки и изготовления технологической оснастки при изготовлении единичных изделий. Однако коммерческое внедрение аддитивных технологий связано с рядом сложностей, которые можно разделить на три группы: связанные с проектированием изделий, прогнозированием свойств материалов и обеспечением надежности технологического процесса.

При проектировании изделий для аддитивных технологий появляется возможность исходить из функционального назначения изделия, то есть использовать для проектирования методы топологической оптимизации [14]. При определении целевой функции и критериев оптимизации необходимо выявить и учесть технологические особенности и ограничения выбранной технологии производства изделия. Методы топологической оптимизации реализованы в программных пакетах OptiStruct (Altair Engineering, США), SIMULIA Tosca (Dassault Systemes, Франция), ANSYS Mechanical

(ANSYS, США), MSC.Nastran (MSC Software, США) и др. Возможность применения методов топологической оптимизации при проектировании изделий авиационной техники показана в [8].

Дополнительным способом уменьшения массы конструкции является выбор геометрии и плотности внутреннего заполнения изделия [15]. При этом встает задача оптимизации формы элементов внутренней структуры, которая может быть решена за счет создания трехмерных моделей представленных объемов материала. Практический интерес представляет создание внутреннего заполнения с неоднородной плотностью в зависимости от нагружения тех или иных областей детали. Необходимые расчетные методы реализованы в программных комплексах Abaqus 2016 RVE Plug-In (Dassault Systemes, Франция) и SIMULIA Tosca (Dassault Systemes, Франция).

Поведение готового изделия во многом определяется теми изменениями, которые происходят в материале в процессе изготовления. Так, при использовании SLS, SLM и других технологий в ходе изготовления изделия каждая его область подвергается сложному циклу тепловых нагрузок, включающих быстрый локальный нагрев и охлаждение, а также постоянный нагрев и охлаждение при нанесении смежных объемов материала. Это приводит к формированию сложной микроструктуры материала и вызывает анизотропию его свойств [16, 17]. Таким образом, возникает потребность в разработке методов прогнозирования микроструктуры и создания математических моделей материалов, которые могут быть использованы при выполнении расчетов конструкции на статическую и динамическую прочность.

Получение годных деталей, соответствующих требованиям по геометрической точности и механической прочности, сопряжено с рядом трудностей, обусловленных техническими особенностями процесса аддитивного формообразования. Тепловые явления в процессе изготовления детали приводят к возникновению остаточных напряжений, способных вызвать возникновение трещин и разрушение изделия, а также отклонение его формы при охлаждении. Для построения имитационных моделей аддитивных технологических процессов, позволяющих прогнозировать напряженно-деформированное состояние детали после ее изготовления, используется технология активации/деактивации элементов конечно-элементной сетки. Последовательная активация элементов производится в соответствии с информацией о траектории движения нагревательного элемента или экструдера, полученной из машинного кода. При этом существенную сложность составляет описание граничных условий процесса теплопередачи, так как в процессе формообразования происходит постоянное изменение конфигурации поверхности, с которой происходит перенос тепла конвекцией или излучением. Требуемыми функциональными возможностями обладает программный комплекс Abaqus AM Plug-In (Dassault Systemes, Франция).

Ряд технологий, включая технологию послойного наплавления (FDM), требуют использования поддержек. В связи с этим возникают задачи, связанные с выбором наиболее рациональной структуры поддержек, оценкой влияния поддержек на тепловые процессы при изготовлении изделия, определением реакции конструкции на удаление системы поддержек, выражающейся в изменении ее напряженного состояния. Для решения этих задач используются алгоритмы топологической оптимизации и метод поэлементного добавления/удаления материала.

Таким образом, применение технологий компьютерного моделирования на различных этапах жизненного цикла изделий позволяет проектировать и изготавливать изделия, отвечающие требованиям по прочности, жесткости и стойкости к внешним воздействиям, с учетом технологических особенностей процессов аддитивного формообразования. За счет этого появляется возможность рассматривать аддитивные технологии как один способ изготовления полнофункциональных деталей из металлов и полимеров, пригодных для работы в составе инженерных конструкций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для рассмотренных новых производственных технологий характерно наличие выраженных зависимостей между параметрами технологического процесса и функциональными свойствами изделия. Фактически, конструкция и материал формируются одновременно в процессе изготовления изделия. Для оптимальных конструкций или конструкций с заданными функциональными характеристиками свойства материала в каждой области конструкции должны быть заданы при проектировании изделия. Таким образом, главной задачей является формирование требований к свойствам материала и их технологическая реализация в заданных областях конструкции. Для решения этой задачи используется предложенный в статье метод, основанный на комплексном использовании систем компьютерного моделирования на всех этапах разработки изделия. На базе описанного метода разрабатываются методики проектирования конкретных классов изделий с учетом специфики производственных технологий и отраслей (типовых параметров конструкций, функциональных требований и др.).

Результаты, полученные в ходе исследования, также могут быть использованы для модернизации образовательных программ для подготовки специалистов нового поколения, обладающих актуальными знаниями в сфере применения новых материалов и производственных технологий для изготовления конкурентоспособных изделий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ready for take-off: Doors on the A350 with a primary structural component made from Victrex polymer [Электронный ресурс] URL:

- <https://www.victrex.com/ru/news/2015/09/airbus-bracket> (дата обращения: 07.10.2016).
- New bracket technology specified for use on Bombardier platforms driving down fuel and manufacturing costs [Электронный ресурс] URL: <https://www.victrex.com/ru/news/2015/06/denroy-brackets> (дата обращения: 07.10.2016).
 - Lindbäck J. E., Björnsson A., Johansen K. New Automated Composite Manufacturing Process: Is it possible to find a cost effective manufacturing method with the use of robotic equipment? // The 5th International Swedish Production Symposium 6th-8th of November 2012 Linköping, Sweden. 2012. С. 523-531.
 - Jeffries, K., Enhanced Robotic Automated Fiber Placement with Accurate Robot Technology and Modular Fiber Placement Head, SAE Int. J. Aerosp. 6(2) 2013.
 - Wells D., Walker A. Integrating Ultrasonic Cutting with High-Accuracy Robotic Automatic Fiber Placement for Production Flexibility // Proc. Society for the Advancement of Material and Process Engineering (SAMPE) Annual Conference and Exhibition. – 2014.
 - Vashishtha V. K., Makade R., Mehla N. Advancement of rapid prototyping in aerospace industry-a review // International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST). 2011. Т. 3. №. 3. С. 2486-2493.
 - Rokicki P. et al. Manufacturing of aircraft engine transmission gear with SLS (DMLS) method // Aircraft Engineering and Aerospace Technology. 2016. Т. 88. №. 3.
 - Васильев Б. Е., Магеррамова Л. А. Анализ возможности применения топологической оптимизации при проектировании неохлаждаемых рабочих лопаток турбин // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2015. Т. 14. №. 3-1.
 - Яблочников Е. И., Грибовский А. А., Пирогов А. В. Эффективность применения аддитивных технологий для изготовления литевых форм и при подготовке производства изделий из термопластичных полимерных материалов // Металлообработка. 2013. № 5-6 (77-78). С. 74-80.
 - Яблочников Е. И., Брагинский В. А., Восоркин А. С. Применение систем виртуального моделирования при выборе и проектировании полимерных композиционных материалов // Известия вузов. Приборостроение. 2012. Т.55, № 7. С. 75-80.
 - Яблочников Е. И., Демкович Н. А., Восоркин А. С. Применение методов и средств компьютерного моделирования в интегрированном процессе проектирования и технологической подготовки производства оптических приборов и систем // Системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования Земли. Материалы XI научно-технической конференции - 2014. С. 196-199
 - Kattamuri C. S., Seyfarth J., Assaker R. Taking into Account Glass Fiber Reinforcement in Polymer Materials: The Nonlinear Description of Anisotropic Materials // SAE Technical Paper, 2011. №. 2011-26-0057.
 - Landervik M., Jergus J. Digimat Material Model for Short Fiber Reinforced Plastics at Volvo Car Corporation // European LS-DYNA Conference. Würzburg, Germany. 2015.
 - Tang, Y., et al., A framework to reduce product environmental impact through design optimization for additive manufacturing, Journal of Cleaner Production (2016), <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.037> (дата обращения: 07.10.2016)
 - Iyibilgin O., Yigit C., Leu M. C. Experimental investigation of different cellular lattice structures manufactured by fused deposition modeling // Proceedings of the 24th International Solid Freedom Fabrication Symposium on Additive Manufacturing. 2013. С. 12-14.
 - Ponche R, Kerbrat O, Mognot P, Hascoet JY (2014) A novel methodology of design for Additive manufacturing applied to additive laser manufacturing process. Robot Comput Integr Manuf 30(4):389-398. doi:10.1016/j.rcim.2013.12.001
 - Herzog D., Seyda V., Wycisk E., Emmelmann C., Additive manufacturing of metals, Acta Materialia, Volume 117, 15 September 2016, Pages 371-392, ISSN 1359-6454, <http://dx.doi.org/10.1016/j.actamat.2016.07.019> (дата обращения: 07.10.2016).

NUMERICAL SIMULATION IN IMPLEMENTATION OF NEW MANUFACTURING TECHNOLOGIES

© 2016 N. A. Demkovich¹, I. A. Volkov², E. I. Yablochnikov¹

¹ ITMO University, Saint-Petersburg

² Bee Pitron SP Ltd., Saint-Petersburg

The article presents the results of analysis of approaches to the design of products manufactured using new production technologies. Several new technologies are discussed, including injection molding of thermoplastic composite materials, robotic automated tape layout, and additive technologies. It is shown that for the considered technologies the microstructure of the component and thus the behavior of the part is influenced by the parameters of the manufacturing process. The challenges of structural and process design are investigated for each of the selected technologies, and the solution based on the integrated application of computer-aided design systems is suggested. The corresponding features of modern numerical simulation systems are presented. *Keywords:* numerical modeling, injection molding, polymer composite materials, additive technology, automated layout prepreg tapes.

Natalia Demkovich, Postgraduate Student.

E-mail: dna@beepitron.com

Igor Volkov, Deputy CEO – Head of Sales Department.

E-mail: via@beepitron.com

Eugeny Yablochnikov, Candidate of Technics, Associate Professor, Head at the Instrumentation Technologies Department. E-mail: eugeny@beepitron.com