

УДК 629.76/.78.01

А. Н. Коваленко, А. А. Прокопчук, И. Л. Снегирев

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПРОБЛЕМЫ ИХ ВНЕДРЕНИЯ В УКРАИНЕ

Процесс внедрения новых технологий на ГП «КБ «Южное» требует существенного изменения способов проектирования изделий аэрокосмического назначения и методов управления проектами, что позволит реализовать новые возможности, снизить издержки изготовления при одновременном повышении качества изделий. Приведены новые программные продукты, направленные на решение проблем, выявленных при использовании аддитивных технологий на ГП «КБ «Южное», такие как Autodesk Netabb, AM Process Simulation, ESI Additive Manufacturing и другие, которые позволяют оптимизировать модель под аддитивные технологии путем изменения структуры материала, учета и компенсации термических усадок при печати, предлагают инструментарий для создания бионического дизайна. Создание новой технологии получения охлаждаемого соплового блока камеры ЖРД без применения пайки стало возможным за счет комплексного подхода, с оптимальным сочетанием как уже существующих технических решений, так и принципиально новых, таких как лазерная сварка и наплавка. Рассмотрен стоимостный анализ как наиболее эффективный метод оптимизации при выборе оптимальной конструкции и технологии изготовления для возможной реализации его на предприятии. Кадровый вопрос, повышение качества и производительности труда на всех этапах производства являются основополагающими для снижения себестоимости изготовления.

Ключевые слова: аддитивные технологии, программные продукты, оптимизация, качество.

Процес впровадження нових технологій на ДП «КБ «Південне» потребує істотної зміни способів проектування виробів аерокосмічного призначення та методів керування проектами, що дозволить реалізувати нові можливості, зменшити витрати виробництва з одночасним підвищенням якості виробів. Наведено нові програмні продукти, спрямовані на вирішення проблем, які було виявлено під час використання адитивних технологій на ДП «КБ «Південне», такі як Autodesk Netfabb, AM Process Simulation, ESI Additive Manufacturing та інші, які дозволяють оптимізувати модель під адитивні технології шляхом зміни структури матеріалу, урахування та компенсації термічних усадок під час друку, пропонують інструментарій для створення біонічного дизайну. Створення нової технології одержання охолоджуваного соплового блока камери РРД без застосування паяння стало можливим завдяки комплексному підходу, з оптимальним поєднанням як вже існуючих технічних рішень, так і принципово нових, таких як лазерне зварювання та наплавлення. Розглянуто вартісний аналіз як найбільш ефективний метод оптимізації під час вибору оптимальної конструкції і технології виготовлення для можливої реалізації його на підприємстві. Кадрове питання, зростання якості та продуктивності праці на всіх етапах виробництва є основними для зниження собівартості виготовлення.

Ключові слова: адитивні технології, програмні продукти, оптимізація, якість.

The process of introducing new technologies at Yuzhnoye SDO requires major changes of aerospace products designing methods and project management methods, which allows realizing new opportunities, reducing manufacturing expenses with simultaneous increase of products quality. New software products are presented directed at solving the problems identified when using additive technologies at Yuzhnoye SDO. Such as Autodesk Netfabb, AM Process Simulation, ESI Additive Manufacturing and others that allow optimizing the model for additive technologies through the change of material structure, taking into account and compensation of heat setting during printing propose the tools for creating bionic design. Creation of new technologies of producing cooled nozzle block of LRE chamber without soldering became possible due to integrated approach, with optimal combination of already existing technical solutions with principally new ones, such as laser welding and surfacing. The cost analysis is considered as the most effective optimization method at selection of optimal design and manufacturing technology for its possible implementation at the company. The personnel problem, the issues of quality improvement and labor productivity increase in all production phases are foundational to reduce manufacturing cost.

Key words: additive technologies, software products, optimization, quality.

При создании высокотехнологичных изделий аэрокосмического назначения определяющими факторами являются функциональные характеристики, стоимость и качество (надежность) изделия, а также сроки разработки и изготовления. Коммерческий успех разработки во многом определяется оптимальным соотношением вышеуказан-

ных факторов. В последние годы среди новых разработчиков-изготовителей космических ракет-носителей наблюдается устойчивый тренд, направленный на снижение стоимости изготовления и эксплуатации. Следует отметить, что снижение стоимости достигается преимущественно за счет внедрения новых технологий, снижения издержек изготовления, улучшения логистики. Процесс внедрения новых технологий не означает просто «механической» замены старой технологии на новую. Для эффективного использования и реализации всех потенциальных возможностей новых технологий в большинстве случаев требуется существенное, а в некоторых случаях революционное изменение методов и философии проектирования. В общем случае конструктор при проектировании нового изделия использует «библиотеку» из наработанных проверенных технических решений, и только в обоснованных случаях происходят создание и отработка нового технического решения, которое дополняет существующую «библиотеку». До недавнего времени размеры «библиотеки» (количество проверенных технических решений и ноу-хау) определяли опыт и ожидаемый коммерческий успех разработчика, в том числе и ГП «КБ «Южное». Однако появление новых, принципиально отличимых от традиционных, технологий требует замены составляющих элементов в «библиотеке». Без этого невозможно создание коммерчески привлекательного продукта. Поэтому необходимо как можно скорее нарабатывать новые технические (конструкторско-технологические) решения, позволяющие эффективно использовать все преимущества новых технологий. А для этого необходимы подготовленные и специально обученные кадры и время, потому что исполнителям требуется поменять философию проектирования и изучить инструменты, позволяющие реализовать новые возможности.

В общем можно выделить одну из главных особенностей новых технологий: создание объекта происходит не путем, свойственным традиционным технологиям, вычитания (создание изначально большой заготовки и последующее удаление «лишнего» материала при помощи механической обработки), а при помощи наращивания материала в требуемых местах. Под новыми

технологиями прежде всего понимаются аддитивные технологии, которые развиваются колоссальными темпами и применяются практически во всех отраслях производства. Однако есть и другие новые технологии, применение которых имеет локальный характер. Для ЖРД примером такой технологии может служить новая технология производства сопловых охлаждаемых блоков [1], в которой исключены трудоемкие процессы подготовки под пайку и сама пайка, а также применяется лазерная наплавка, которая, по сути, является элементом аддитивной технологии. Отличительной особенностью новых технологий является существенный перенос трудозатрат с процесса изготовления на процесс подготовки. Впрочем, вскоре процессы оптимизации и подготовки 3D-моделей также будут автоматизированы.

В настоящее время имеется несколько программных продуктов, предназначенных для оптимизации конструкции и 3D-моделей под применение аддитивных технологий.

Опыт ГП «КБ «Южное» показывает, что при 3D-печати методом SLM возникают термические усадки и деформации деталей. Так, например, при печати первых экземпляров газоподводящих камер двигателя РД809К утонение стенки из-за усадки составило до 7%. Для компенсации этого явления конструктору пришлось корректировать 3D-модель вручную. В другом случае, при печати сложнопрофильного корпуса теплообменника, имело место искажение формы детали, обусловленное несимметричностью модели и наличием местных утолщений конструкции. Для компенсации этих искажений необходимо либо создавать технологические припуски в детали (что приводит к повышенному расходу порошка при печати и существенному увеличению трудоемкости постобработки), либо скорректировать модель. Однако в большинстве случаев эта работа, выполняемая вручную по интуиции, достигает успеха методом проб и ошибок длительным и затратным методом. В то же время компания Siemens PLM Software выпустила решение Simcenter 3D AM Process Simulation, которое помогает разработчику проектировать сложные детали, прогнозировать и компенсировать усадку и деформации, возникающие в процессе 3D-печати. Про-

грамма AM Process Simulation оценивает возможные деформации при изготовлении деталей методом лазерного спекания или наплавления металлопорошковых композиций и автоматически корректирует геометрию 3D-модели для компенсации этих отклонений.

При использовании аддитивных технологий на ГП «КБ «Южное» отмечается также группа проблем, связанных с подготовкой 3D-модели для печати: определение оптимального пространственного положения детали в камере построения; построение суппортов и выбор их оптимальной структуры с учетом постобработки; создание технологических припусков и баз, предназначенных для компенсации возможных зарезов при удалении суппортов и для облегчения постобработки, размещение в одной садке максимально возможного количества деталей и др. В настоящее время эти проблемы решаются вручную с применением программы Magic.

На рынке появились новые программные продукты, направленные на решение этих и других проблем, выявленных при внедрении аддитивных технологий. Одной из таких программ является Autodesk Netfabb, которая позволяет либо создавать 3D-модели, либо импортировать их из других программ с поверхностной или фасетной геометрией, при этом происходит автоматическое исправление триангуляционной сетки от дефектов, вызванных импортированием модели из других форматов. Netfabb, по информации разработчика, позволяет оптимизировать модель под аддитивные технологии путем замены внутренних монолитных участков на облегченную решетчатую или ячеистую структуру, что позволяет значительно снизить стоимость производства и массу детали, не потеряв при этом в прочности. В результате модель может приобрести дополнительные свойства: пористость, гибкость, упругость, в том числе анизотропные. Появляется новое качество, например, анизотропный капиллярный эффект, который можно использовать для создания элементов транспирационного охлаждения камер ЖРД – самого эффективного метода охлаждения. Разработчик модели указывает тип заполняющей решетки, определяет поверхности и назначает нагрузки, после

чего Netfabb осуществляет автоматический поиск оптимального решения с внутренней решетчатой структурой переменной плотности, что позволяет снижать массу деталей без потери прочности.

Отдельно стоит поговорить о топологической оптимизации. Autodesk Netfabb, ESI Additive Manufacturing (Siemens) и другие разработчики предлагают инструмент для создания бионического дизайна. В этом случае меняется не заполнение внутренних объемов, а сама топология (форма и конфигурация) детали. Для этого с помощью встроенного в Netfabb решателя Nastran проводится прочностной анализ, в результате которого из модели удаляются зоны с наименьшими внутренними напряжениями, незначительно влияющие на прочность. Таким образом, деталь облегчается, а ее прочность остается в заданных пределах.

В Netfabb есть опция Generative Design, в которой форму детали изобретает не человек, а компьютер. Пользователь задает границы и ограничения, а также критерии поиска – желаемую массу, величины деформаций и так далее. Машина выдает множество вариантов, наиболее оптимальный из которых выбирается при помощи наглядного сравнительного анализа и фильтрации по различным параметрам.

Оптимальное положение детали в рабочем пространстве принтера и создание суппортов Netfabb определяет автоматически, при этом остается возможность ручной редакции. Для снижения стоимости изготовления необходимо печатать много деталей в одной садке, поэтому необходимо иметь механизм, который разместит модели максимально плотно в рабочем пространстве принтера в один или несколько слоев. Для разных принтеров Netfabb использует разные алгоритмы упаковки. Перед проведением печати с помощью Netfabb Simulation выполняется виртуальная имитация печати, при которой выявляются и устраняются возможные проблемы, например, путем автоматической корректировки 3D-модели.

Развитие аддитивных технологий происходит стремительными темпами. Совершаются как существующие технологии (как правило, в направлении увеличения размеров камеры построения), так и постоянно создаются новые технологии. При этом

главная направленность в разработках новых технологий – это снижение стоимости изготовления. Спектр аддитивных технологий расширялся и будет расширяться дальше, оптимизируются методы передачи энергии в зону соединения (лазер, ЭЛУ, плазма и другие), тип первичного материала (порошок, проволока, полимер-металлические филоменты и др.). Поэтому нет вопроса внедрять или не внедрять аддитивные технологии. Главный вопрос в другом – внедрять сейчас или подождать пока рынок насытится и оборудование подешевеет. Только в компании GE сейчас работают более 300 3D-принтеров. Вероятно, в ближайшие годы оборудование для аддитивных технологий, по крайней мере основной сегмент, станет более доступным и дешевым, что непременно скажется на общей ситуации в производстве высокотехнологичной продукции, прежде всего аэрокосмической. Надо быть готовым к этому. Следует отметить, что аддитивные технологии не могут быть эффективнее, чем традиционные технологии, во всех областях по всем типам деталей. Оптимальным решением будет компромисс: что-то целесообразней производить традиционными технологиями, а что-то – аддитивными. Но, безусловно, со временем доля аддитивных технологий будет только увеличиваться.

Blue Origin и Space X активно внедряют аддитивные технологии в свои новые разработки. Однако для Тима Эллиса и Джордана Нуна, выходцев из этих компаний, темпы внедрения показали себя чрезвычайно медленными, и они организовали компанию Relaviti Space, которая намерена довести степень использования аддитивных технологий до максимума. Наглядным примером является двигатель Aeon, состоящий всего из трех деталей, изготовленных методом 3D-печати. Этим ребятам не остановило даже отсутствие на рынке оборудования для изготовления нужных им деталей, например баков. В этом случае компания разработала собственную технологию аддитивного производства, основанную на наплавлении металлических прутков с помощью высокомоощных лазеров, с использованием промышленных роботоманипуляторов. Как результат, алюминиевый бак длиной 3,3 м был изготовлен за три недели, включая механическую постобра-

ботку. Данный пример в какой-то степени напоминает принцип «открытой архитектуры», который способствовал взрывному развитию компьютерной техники. С другой стороны, он показывает, что нет невыполнимых задач, что все ограничения сидят в наших головах, создайте только условия для творчества. Еще один пример – Питер Бек, основатель компании Rocket Lab, которая также максимально широко использует аддитивные технологии при создании ракет-носителей, и за счет их внедрения намеревается производить 52 пуска в год. Эти примеры наглядно показывают, как и за счет чего вновь образованные малочисленные компании ворвались на рынок космических услуг. То есть на фоне общего дрейфа промышленности в сторону расширения применения аддитивных технологий имеются отдельные крайне малочисленные компании, которые задают направление этого движения, отрабатывают новые технологические и логистические решения. Множество новых технических (в большей степени технологических) решений, связанных с аддитивными технологиями, опробуется в различных стартапах, в которых молодым командам дается шанс на реализацию своих идей. Этот прием не нов, в частности аналогично происходил прорыв в авиационной промышленности СССР в предвоенные годы.

Развитие специализированных новых технологий, таких как изготовление сопловых блоков без пайки, имеет свои специфические особенности. Если проблемами аддитивных технологий общего назначения занимается большое количество организаций, которые затем, как правило, на альтернативной основе предлагают уже готовое к внедрению решение, то в данном случае все свое: и решение проблем, и дивиденды от внедрения. При создании принципиально новых технологий чрезвычайно сложно на старте составить подробный план-график выполнения работ, заранее предсказать издержки разработки. Такие работы целесообразно проводить по адаптивному плану, который постоянно корректируется по ходу выполнения работ. В большинстве случаев разработка новых технологий выполняется в партнерстве с институтами НАНУ. В разработке новой технологии изготовления сопловых блоков без пайки активное участие принима-

ет ИЭС им. Патона. Эта технология является наглядным примером комплексного подхода к вопросу снижения издержек производства: кроме трудоемкой пайки из производственного цикла удалена также многоэтапная (от пяти до восьми переходов) штамповка заготовок внутренней и наружной стенок, и сокращен объем механической обработки деталей. Это достигается за счет применения холодной ротационной вытяжки.

При выборе оптимальной конструкции и технологии изготовления одним из наиболее эффективных методов оптимизации является стоимостный анализ [2], который широко применяется в мировой практике. Однако для его правильной реализации требуется подробная калькуляция себестоимости всех технологических операций и расходов на приобретение материалов и комплектующих изделий, причем для каждого из рассматриваемых вариантов. В действительности у наших разработчиков отсутствует объективная информация по издержкам производства всего изделия в целом, не говоря уже об отдельных операциях. Без этой информации крайне затруднительно найти и достоверно обосновать оптимальный вариант конструкции и метод изготовления. Такая ситуация была условно допустима тогда, когда имелся один генеральный подрядчик, который и определял стоимостную политику. Но в условиях диверсификации изготовителей уже крайне целесообразно при выборе подрядчика знать себестоимость каждой технологической операции. Например, в опытном производстве ГП «КБ «Южное» были изготовлены на 3D-принтере SLM 280HL ряд деталей, однако фактическая себестоимость изготовления этих деталей, необходимая для проведения стоимостного анализа, не известна, так как по существующим методикам учитываются только повторяющиеся затраты (расходные материалы и трудозатраты). При этом начальные затраты, связанные с покупкой оборудования, созданием рабочего участка, а также проведением технического обслуживания оборудования, обучения персонала и т.п., относят, как правило, к общим производственным затратам. Для новых технологий, например для 3D-печати, учет только амортизации оборудования может поднять себестоимость в два раза и более.

В общем, кадровый вопрос по-прежнему остается определяющим в решении данных задач. Это связано с тем, что только хорошо подготовленный и правильно мотивированный персонал обеспечит внедрение новых технологий так, чтобы это сопровождалось одновременно и повышением характеристик, и снижением стоимости. Требуется системный анализ, причем на всех этапах – от проектирования (разработка технического задания) до передачи изделия заказчику. Так, например, обеспечение предельно высоких основных характеристик, заданных в техническом задании на разработку изделия, приводит к существенному росту стоимости разработки и изготовления и, особо остро, стоимости огневой отработки. Задание щадящих требований, напротив, способствует снижению издержек и технического риска, уменьшает сроки разработок.

Одним из наиболее эффективных способов снижения себестоимости изготовления является повышение качества в широком смысле этого понятия. Этот, на первый взгляд, неочевидный вывод подробно описан в работах Деминга [3], одного из авторов японского экономического чуда. При внимательном рассмотрении убеждаешься, что Деминг, безусловно, прав. На практике невысокое качество, пусть даже на одной из производственных операций, неизбежно приводит к необходимости индивидуального подхода к исправлению отклонений. В этом исправлении участвуют много специалистов, как правило, самых квалифицированных. Процесс исправления приводит к трудно контролируемым и прогнозируемым простоям оборудования и т.д. Для поддержания качества необходима командная работа на всех этапах изготовления – от входного контроля до приемосдаточных испытаний. И здесь, опять-таки по Демингу, необходимо постоянно улучшать все процессы планирования, изготовления и сбыта. Работа с персоналом, направленная на подготовку и переподготовку кадров, также один из краеугольных камней его системы обеспечения качества. Здесь есть свои сложности: с одной стороны, необходимо обучить сотрудников предприятия новым проектным технологиям (Autodesk Netfabb, ESI Additive Manufacturing и другие), с другой – существует реальная опасность того, что обучен-

ные специалисты, набравшись опыта, уйдут в коммерческие структуры. Следует отметить, что система поощрения в виде надбавок, жестко привязанных к стоимости работ, отнюдь не способствует снижению себестоимости разработок. В большинстве случаев чем больше издержки, тем больше надбавки. В этом случае целесообразно изучить и применить опыт советского метода повышения эффективности (МПЭ), который с успехом использовался в СССР с конца 30-х до конца 50-х гг. и в Японии с 1955 г. Главной целью МПЭ являлось снижение издержек производства, повышение производительности труда, повышение качества. Главными инструментами в этой системе были материальные и моральные стимулы, которые способствовали творческой активности всех задействованных в производстве работников. При этом важным было сохранение позитивного морально-психологического климата в коллективе. При такой системе будет невозможной ситуация, когда дорогостоящее высокотехнологичное оборудование используется менее 5% от производственного времени, как это имеет место с 3D-принтером SLM 280HL на ГП «КБ «Южное».

Кроме того, необходимо пересмотреть всю логистику и технологические подходы. Здесь имеется много скрытых резервов, которые можно реализовать при использовании нового высокотехнологичного оборудования. Например, при изготовлении форсунок одной из наиболее трудоемких операций является контроль гидравлических характеристик, который выполняется индивидуально для каждой форсунки. Если новое производство за счет применения нового оборудования обеспечивает принципиально лучшую повторяемость, то статистически можно отказаться от массового 100%-ного контроля, заменив его выборочным. Но в этом случае необходимо постоянно поддерживать качество на всех этапах производства.

К глобальным проблемам, свойственным украинским предприятиям при внедрении новых технологий, следует также отнести: высокую стоимость и ограниченную доступность нового оборудования, металлических порошков требуемого ассортимента, ограниченный доступ к результатам научных исследований, отсутствие государственной поддержки. На практике существует боль-

шая вероятность санкционной угрозы в вопросах приобретения оборудования и современных расходных материалов, проведения мобильной технической поддержки.

В заключение можно отметить, что в условиях государственного предприятия в Украине чрезвычайно сложно своевременно реализовать новый технологический уклад, определяемый аддитивными технологиями. Это обусловлено бюрократическими издержками, ограничениями, заложенными в хозяйственных и экономических нормативах для государственных предприятий. Для решения этой проблемы возможно, по примеру ФЭДа, создание отдельной формально независимой организации с немногочисленным хорошо подготовленным и мотивированным персоналом. Либо переход на контрактную систему найма для определенного количества специалистов с одновременным изменением структуры управления предприятием (по типу свободной экономической зоны), разработкой новых экономических нормативов и т.п. Выше говорилось, что для достижения успеха требуется командная работа. В этом плане от экономистов ждут создания новых правил (нормативов и методик), обеспечивающих правильную мотивацию всех подразделений предприятия, направленную на снижение издержек и повышение качества. В любом случае необходимо предпринимать срочные меры, потому что конкуренты уходят «в отрыв» и дальше ситуация для ГП «КБ «Южное» будет только ухудшаться.

Список использованной литературы

1. Коваленко А. Н. и др. Разработка новой технологии изготовления сопловых блоков без использования пайки/ А. Н. Коваленко, Д. В. Кирсанов, Н. А. Миросиди, В. Д. Шелягин, А. В. Бернацкий, А. В. Сиора // Космическая техника. Ракетное вооружение: Сб. науч.-техн. ст. – Вып. 2 (116). – 2018. – Днепропетровск: ГП «КБ «Южное». – С. 68-75.
2. Джонс Дж. К. Методы проектирования. – М.: Мир, 1986.
3. Нив Генри Р. Пространство доктора Деминга. – М.: Альпина Паблишер, 2005.

Статья поступила 01.03.2019