

УДК 678.046

Разработка крупногабаритной неметаллической оснастки для формования деталей на основе полиуретанов и гибридных пластиков

А.С. Малюгин, М.М. Смирнов

Аннотация

При изготовлении крупногабаритных изделий из полимерных композиционных материалов и в специальных технологических процессах, применение обычных металлических форм становится нерентабельным вследствие большой металлоёмкости, высокой трудоёмкости изготовления (слесарной и механической обработки) и энергоёмкости процесса.

Для решения этой проблемы более эффективным является использование крупногабаритной технологической оснастки из полимерных композиционных материалов.

Для повышения чистоты формирующей поверхности оснастки из полимерных композиционных материалов, в проекте применяют гелькоут на основе полиуретана или полимочевин холодного отверждения.

В результате проведённых исследований были подобраны оптимальные соотношения полимерных материалов в конструкциях оснастки для различного применения.

Ключевые слова

Оснастка; композиты; полимерный композиционный материал; авиастроение; переработка полимеров; полимочевины холодного отверждения.

Введение

При изготовлении крупногабаритных изделий из полимерных композиционных материалов и в специальных технологических процессах, применение обычных

металлических форм становится нерентабельным вследствие большой металлоёмкости, высокой трудоёмкости изготовления (слесарной и механической обработки) и энергоёмкости процесса.

В настоящее время специалисты ФГУП «ММПП «Салют» разработали и широко применяют в производстве крупногабаритную формообразующую оснастку из полимерных композиционных материалов с рабочим гелкоутным слоем из полиуретанов или полимочевин холодного отверждения высокой твёрдости. Основными конструкционным материалом оснастки являются различные материалы – стеклопластики, углепластики, дерево, дюраль и др. к которым приформован размероточный слой из полиуретана. Это позволяет повысить количество съёмов изделий с оснастки, качество поверхности и обеспечивает минимальную шероховатость и ремонтпригодность. Для решения этой проблемы более эффективным является использование крупногабаритной технологической оснастки из полимерных композиционных материалов.

Для повышения чистоты формирующей поверхности оснастки из полимерных композиционных материалов, в проекте применяют гелкоут на основе полиуретана или полимочевин холодного отверждения.

Изготовление крупногабаритной и технологической оснастки из полимерных композиционных материалов осуществляется с использованием метода контактного формования на мастер–модели, из легкообрабатываемых материалов (дерево, гипс и т.п.), также с нанесённым гелкоутным покрытием из эластомеров холодного отверждения.

Конструкция оснастки состоит из оболочки (толщиной 3 – 12 мм в зависимости от габаритов и конструкции детали, из них 1 – 3 мм – гелкоут) усиленной рёбрами жесткости по нерабочей поверхности оснастки. Для обогрева оснастки между рёбер жесткости предусмотрели возможность монтировать нагреватели. Рабочая температура оснастки оценивается типом связующего и в настоящей работе не превышает 200⁰С. Допустимое давление формования составляет 0,9 МПа. Цикл изготовления полимерной оснастки на порядок короче цикла изготовления из металлов и других материалов.

Для изготовления формообразующей оснастки в проекте предлагается использовать гибридную конструкцию из различных связующих: эпоксидных, полиэфирных, полиуретановых смол и полимочевин. При этом для полимерных материалов, физико-механические свойства которых изменяются в сравнительно узком температурном диапазоне, особое значение имеет температура эксплуатации, действующая на конструкцию, при условии сохранения материалами определённого минимально допустимого комплекса свойств. Преимущественно полиэфирных – быстрое отверждение (низкая стоимость), но

значительная усадка ограничивает их применение. Полиуретановые смолы и полимочевины имеют низкую усадку, прочны и ударовязки. Их главный недостаток – высокая стоимость. Недостаток полиимидов - применение высоких температур отверждения. Недостаток фенольных смол – готовое изделие обладает хрупкостью, вступает во взаимодействие с другими материалами, кислый катализатор может воздействовать на металлические детали. Наиболее широко используемая эпоксидная смола характеризуется низкой усадкой, высокой прочностью, размерной устойчивостью, хорошей сопротивляемостью коррозии и атмосферному воздействию. Недостаток эпоксидных смол – высокая влагоемкость, низкая теплостойкость.

Таким образом, используемые связующие для изготовления композиционных материалов, в полной мере не удовлетворяют требованиям, предъявляемым к материалам для изготовления крупногабаритной и технологической неметаллической оснастки.

В результате проведенных исследований были составлены оптимальные соотношения полимерных материалов в конструкциях оснастки для различного применения.

Изделие, снимаемое с оснастки, имеет послойную материальную конфигурацию аналогичную оснастке (за исключением силового каркаса из древесины), что сильно повысило геометрическую точность за счёт одинаковых коэффициентов линейного термического расширения (КЛТР) оснастки и детали.

Значительные эксплуатационные и технологические преимущества в производстве и ремонте полимерных оснасток для контактного формования изделий из слоистых пластиков предоставляют высоко реактивные двухкомпонентные системы на основе полиуретанов и полимочевин холодного отверждения.

Для их нанесения на изделия и оснастку, а также переработки в готовую продукцию применяют современные реакторы-дозаторы высокого давления или пневмо-шнековые машины. Отверждение компонентов до геля 3-ей степени происходит за 2-5 секунд непосредственно на поверхности подложки (оснастки), что значительно улучшает технологичность производства сложно профильных и отвесных поверхностей. Способы изготовления оснастки и слоистых гибридных материалов запатентован авторами в собственность ФГУП «ММПП «Салют».

Для решения проблем изготовления крупногабаритной оснастки из полимерных композиционных материалов более эффективным является использование полимочевин в соотношении полиизоцианатов к полиолам 1:1, что упрощает работу с крупногабаритными изделиями.

Традиционно для изготовления финишной формообразующей поверхности оснастки применяют эпоксидные смолы, волокнистые и порошкообразные наполнители различной природы.

Для повышения чистоты поверхности формующей оснастки из гибридных полимерных композиционных материалов на её поверхность, эквидистантно заниженную от теоретического контура на 2-3 мм, наносят тонкослойное (3-5 мм) покрытие - гелькоут на основе полиуретанов или полимочевин холодного отверждения высокой твёрдости 45-55 Шор Д, а затем, обрабатывают по программе в размер на специальном обрабатывающем центре.

Изготовление оснастки из полимерных композиционных материалов осуществляется с использованием метода контактного формования на мастер-модели, из легкообрабатываемых материалов (дерево, гипс и т.п.).

Конструкция оснастки состоит из тонкостенной оболочки (толщиной 3 – 12 мм в зависимости от габаритов и конструкции детали) усиленной ребрами жесткости по нерабочей поверхности оснастки. При необходимости оснастка устанавливается на металлический каркас и может быть изготовлена вакуумным прессованием в мешке. Цикл изготовления такой оснастки на порядок короче цикла изготовления традиционной оснастки из металла.

В настоящее время в авиационной промышленности используется большое количество изделий из полимерных материалов. Проектирование и технологический расчет оснастки для них всегда был очень трудоемким процессом и занимал большое количество времени. В существующих условиях производства проводится поиск оптимального решения, основываясь на анализе существующего оборудования, типа оснастки и выбора из большого количества данных материалов и нормализованных элементов конструкции. Однако данные по выбору оснастки не обобщены, что затрудняет выбор, приводит к потере времени на поиск, а также проработку информации и увеличивает риск ошибки при проектировании технологической оснастки.

Для решения этой проблемы использовалась автоматизированная информационная система (АИС) СУБД «УАК» - Система управления базами данных «Универсальный аналитический классификатор» на базе универсального аналитического классификационного метода. СУБД «УАК» предназначена для работы с базами данных, которые являются классификаторами объектов и их свойств, для поиска конкретных элементов оснастки.

На основе СУБД «УАК» сформирована классификационная модель «Оснастка, свойства и нормализованные элементы» и баз данных (БД) оснастки. СУБД «УАК»

позволяет работать как обучающая, поисковая БД и справочная система для студентов и инженерно-технических работников в машиностроении по оснастке и нормализованным элементам для нее.

Такая СУБД «УАК» позволяет:

1. Оптимизировать поиск необходимой информации.
2. Выбор нормализованных элементов под конкретную оснастку.
3. Структурировать классификационную модель «Оснастка, свойства и нормализованные элементы» в виде сложного графа.
4. Обеспечить объектную ориентированность поиска.
5. Сократить затраты и сроки на поиск и анализ дополнительных источников информации.
6. Упростить пополняемость БД новой информацией, а также их редакцию.
7. Вывод отчетности.

При изготовлении крупногабаритной формообразующей оснастки используются эпоксидные, полиэфирные, фенольные, полиимидные смолы и конструкционные термопласты. Правильный выбор материалов возможен лишь при учете назначения и реальных условий эксплуатации. При этом, для полимерных материалов, физико-механические свойства которых изменяются в сравнительно узком температурном диапазоне, особое значение имеет температура эксплуатации и продолжительность ее воздействия или величина тепловых потоков, действующих на конструкцию, при условии сохранения материалами определенного минимально допустимого комплекса свойств. Преимущество полиэфирных - быстрое отверждение (низкая стоимость), но значительная усадка ограничивает их применение. Полиуретановые и полимочевинные гелькоуты холодного отверждения имеют низкую усадку, прочны и ударовязки. Их главный недостаток на сегодняшний день - высокая стоимость. К недостаткам полиимидов можно отнести высокую стоимость, применение высоких температур отверждения, в некоторых случаях гигроскопичность. Недостаток фенольных смол - готовое изделие обладает хрупкостью, вступает во взаимодействие с другими материалами, кислый катализатор ограничивает использование ценного наполнителя и может воздействовать на металлические детали. Наиболее широко используемая эпоксидная смола характеризуется низкой усадкой, высокой прочностью, размерной устойчивостью, хорошей сопротивляемостью коррозии и атмосферному воздействию. Недостаток эпоксидных смол - высокая влагеёмкость, но в сочетании с конструкционным покрытием из полиуретанов, которые выполняют также роль

барьера, сочетание полиуретан – эпоксидный пластик – полиуретан достигаются максимальные эксплуатационные характеристики оснастки.

Таким образом, применяемые в настоящее время традиционно используемые связующие для изготовления композиционных материалов, хотя бы по одному показателю не удовлетворяют требованиям, предъявляемым к связующим для изготовления крупногабаритной неметаллической оснастки, а сочетание их в конструкции с современными полиуретанами и полимочевинами обеспечивает наилучший подход к изготовлению оснастки из ПКМ

С этой точки зрения особый интерес для изготовления прочностных оболочковых элементов оснастки представляют акрилатно-эпоксидные связующие, представляющие собой дисперсию порошкообразного акрилового сополимера в вязко-текучей эпоксидной смоле, используемые в качестве покрытий и связующих, благодаря высокой теплостойкости, отсутствию усадки при отверждении, возможностью получать изделия любой формы, которые могут перерабатываться в изделия различными методами.

Основными компонентами составов являются сополимер метилметакрилата и метакриловой кислоты и эпоксидная смола с различными химическими радикалами. Связующие характеризуются высокими физико-механическими характеристиками. Обладают высокой термостабильностью. При отверждении связующих исключаются проблемы пористости.

В качестве гелькоутного рабочего слоя и завершающего герметизирующего слоя оснастки наиболее целесообразно применять полиуретановые материалы марок «Хай-Кемикал», «Дурабонд», «Тафф-штафф» или полимочевинные материалы марок «Коропур» или «Кородур».

В результате проведенных исследований были составлены рецептуры связующих, отработаны технологические и конструкционные особенности изготовления оснастки в комплексе с изготовлением по ней детали.

Технология изготовления оснастки аналогична производству деталей из композиционных материалов методом выкладки. Заинтересованность многих фирм в оснастке из полимерных композиционных материалов объясняется рядом характерных для нее преимуществ, а именно, коротким временем подготовки, малым весом, простотой эксплуатации, малой теплоемкостью, малой инерционностью (быстрым нагревом и таким же быстрым охлаждением), простотой ремонта, минимальной деформацией детали в процессе отверждения из-за близости коэффициентов теплового расширения материала оснастки и изготавливаемой детали.

Иностранные компании широко применяют неметаллическую оснастку для выкладки, контактно-вакуумного и вакуум автоклавного формования крупногабаритных деталей и узлов сложных форм изделий из ПКМ, тогда как в российской промышленности неметаллическая оснастка в основном применяется в опытном и штучном производстве для деталей и узлов простой формы. Это обусловлено отсутствием выбора отечественных технологических материалов, разделительных слоев, липких лент, пленок для вакуумных мешков, перфорированных пленок, современных формообразующих материалов и др. В промышленности отсутствует типизация крупногабаритных деталей и узлов из ПКМ применительно к неметаллической оснастке. Необходима разработка методики просчета конструкции элементов оснастки.

С каждым годом композиционные материалы находят все более широкое применение в авиакосмической промышленности. Это дает ряд преимуществ, позволяющих повысить эффективность конструкций летательных аппаратов. Применение в конструкции самолета 40-50% полимерных композиционных материалов (ПКМ) от общей массы позволяет снизить его массу на 30% и добиться наибольшей экономии при минимальных эксплуатационных расходах. Например, замена 20% металлических сплавов на ПКМ в конструкции планера пассажирского самолета массой 160 тонн позволяет уменьшить его массу на 17% и повысить полезную нагрузку на 20%. Типовыми представителями конструкций таких деталей и узлов являются панели фюзеляжа, хвостового оперения, крыла, створки шасси, грузолоков, щитков, зализов и другие элементы конструкций самолета в виде обшивок из стекло-, угле-, органопластиков или трехслойных сотовых агрегатов. В основном они представляют собой пологие и крутоизогнутые оболочки одинарной и двойной кривизны, трапециевидные или близкие к прямоугольным в плане с выходом их поверхностей на наружные обводы самолета. Производственные возможности этих материалов в сравнении с традиционными материалами в большой мере определяются выбором материала для оснастки, в которой изготавливаются детали. Наиболее распространенными материалами для производства оснастки являются, прежде всего, металлы, такие как алюминиевые сплавы, сталь и другие сплавы, а также резина, дерево, цемент и гипс. За последнее время значительно расширилось применение жаропрочной керамики, монолитного графита и быстро расширяющегося спектра композиционных материалов, разработанных специально для производства оснастки. Выбор надлежащего материала для оснастки является сложным процессом, требующим учета и баланса многих факторов (начальных затрат, на приобретение, подготовительно-наладочного времени, эксплуатационных расходов и расходов на ремонт,

совместимости с циклом отверждения, пористости, стабильности размеров, количества изготавливаемых деталей, расходов на рабочую силу, простота модификации и т.д.). Правильное соотношение таких различных факторов позволяют сделать выбор наиболее подходящего материала, так как ни один из вышеперечисленных материалов не является универсальным для изготовления оснастки, предназначенной для производства для производства деталей из композиционных материалов.

Металлы, используемые в качестве материалов для оснастки, имеют глубокую историю. С давних пор хорошо зарекомендовала себя оснастка из стали благодаря своей долговечности, высокому качеству и допускам в узких пределах, достигаемых с помощью обработки резанием ее поверхностей на станках с управлением от ЭВМ. Однако подготовительное время при производстве оснастки из стали довольно продолжительное. Ее коэффициент теплового расширения может оказаться проблемой в сочетании с системами композиций. Серьезным недостатком стальной оснастки является ее объемная плотность и теплоемкость, а также плохая маневренность в случае больших габаритов оснастки.

Вышеназванные проблемы резко снижаются при использовании алюминиевой оснастки, поверхности которой, как и стальной оснастки, могут быть без труда обработаны резанием на станках с управлением от ЭВМ. Ввиду того, что алюминий мягче стали, алюминиевая оснастка быстрее поддается истиранию и царапанию.

Для ограниченной партии деталей или для очень быстрого конструирования прототипной оснастки часто применяют оснастку из силиконового каучука. Используя выполненные за одно целое элементы жесткости, возможно изготовление довольно сложных конструкций. При использовании силиконовой оснастки отсутствуют проблемы снятия детали из формы, однако ввиду высокоэластичной природы силиконового каучука оснастка из этого материала подвержена действию разрывных усилий и поэтому характеризуется ограниченным сроком службы.

Фирмой “Boeing” было изготовлено крыло в натуральную величину из высокотемпературных термопластов, армированных волокном графита. Оснастка для изготовления таких деталей сделана на углепластике с термопластичной матрицей.

Фирмой “Rhone- Poulenc” предложен способ изготовления форм из теплостойкой смолы или сплавов с низкой температурой плавления. Применяют бисмалеинимидные связующие и диамины. В качестве наполнителя используют стекловолокно, углеволокно, сажу, графит, дисульфид молибдена, кроме того, можно вводить политетрафторэтилен (ПТФЭ) и металлические наполнители Смесь

порошкообразных наполнителей составляет 20-80% от веса волокон. Смола может содержать до 70% волокнистого наполнителя. Смесь может применяться для изготовления форм модели при 170 °С и 300 °С. Эти формы можно применять для изготовления деталей из терморезистивных и термопластичных материалов.

По сведениям фирмы “Filtrate Co Teledyne Ryan a Hughes”, в качестве материала для крупногабаритной объемной оснастки используется эпоксидный углепластик МХ-7620, с пределом прочности при изгибе - 721 МПа. Фирмами эксплуатировалось более 100 видов этой оснастки.

Фирма “Beech” разработала технологию изготовления деталей и оснастки из эпоксидного графитопластика, для конструкции самолетов “Starship”. При производстве использовался традиционный метод выкладки КМ. Выкладка производилась по гипсовой модели в автоклаве при 95 °С и после снятия оболочки с модели при 180 °С ± 5°. Изготовлено более 60 деталей.

Фирма “Messer-Schmitt-Belkov-Blum” (“Мессер-Шмитт-Бельков-Блум”, “МББ”), применяет оснастку для производства плоских панелей вертикального стабилизатора аэробуса А-300.

Фирма “Du Pont” для деталей на полиимидном связующем применяет модель из монолитного углерода или керамики, оснастка - препрег из углепластика на основе полиэфиркетона (ПЭК), бисмалеинида (БМИ) и термопластичного полиимиды. Температура отверждения - 385 °С.

Фирма “Grumman” использует резиновую оснастку для производства углепластиковой конструкции (углепластиковые обшивки стабилизатора самолета) используя мешок из стеклоткани, пропитанный силиконовой резиной. Силиконовый мешок имеет высокую прочность и может работать при 177 °С.

Фирма «Cessna Aircraft Co» применяет оснастку выдерживающую температуру до 177 °С. Качество препрега обеспечивает до 400 съемов деталей с оснастки.

Фирма «Advanced composites Group» изготовила оснастку из углеволокна для производства обтекателя самолета. Применялись ЛТМ препреги с низкой температурой формования.

Основные требования предъявляемые к материалам таковы:

- согласованный коэффициент термического расширения материалов формируемой детали и оснастки;
- герметичность оснастки;

- длительное термосопротивление.

С этой точки зрения особый интерес представляет разработка новых марок связующих (например: акрилатно-эпоксидных, полимочевинных - гелькоутных), используемых в качестве покрытий и связующих, с высокой теплостойкостью, отсутствием усадки при отверждении, возможностью получать изделия любой формы, которые могут перерабатываться в изделия различными методами. Связующие должны иметь высокими физико-механические характеристики. При отверждении связующих должны исключаться проблемы пористости.

На основе изучения опыта иностранных фирм и отечественных предприятий авиационной отрасли по изготовлению неметаллической оснастки можно сделать выводы, что:

- Иностранные компании широко применяют неметаллическую оснастку для выкладки, контактно-вакуумного и вакуум автоклавного формования крупногабаритных деталей и узлов сложных форм изделий из ПКМ, тогда как в российской промышленности неметаллическая оснастка в основном применяется в опытном и штучном производстве для деталей и узлов простой формы.

- Основными материалами являются стекло- и углепластики.

- Отсутствует выбор отечественных технологических материалов, разделительных слоев, липких лент, пленок для вакуумных мешков, перфорированных пленок и др.

- В промышленности отсутствует типизация крупногабаритных деталей и узлов из ПКМ применительно к неметаллической оснастке.

- Необходима разработка методики просчета конструкции и элементов оснастки.

- Наиболее перспективным направлением, на сегодняшний день, для отечественных авиационных предприятий является использование гибридной оснастки из слоистых пластиков с полиуретановыми гелькоутными слоями на наружной поверхности.

Библиографический список

[1] Боголюбов В.С. Формообразующая оснастка из полимерных материалов. – М.: Машиностроение, 1979, 183 с, ил.

[2] Бухаров С.В., Малюгин С.В., Малюгин А.С. Материаловедческие проблемы технологии изготовления крупногабаритной оснастки из полимерных композиционных материалов. // Новые материалы и технологии – НМТ-2002. Т. 1, с. 89.

[3] Бухаров С.В., Кузнецов С.Н., Малюгин А.С. Разработка СУБД «Клеи для крупногабаритных конструкций из полимерных композиционных материалов». // Новые материалы и технологии – НМТ-2002. Т. 1, с. 88.

[4] Бухаров С.В., Малюгин А.С. Крупногабаритная формообразующая оснастка для изготовления изделий из полимерных композиционных материалов. // Теория и практика технологий производства изделий из композиционных материалов и новых металлических сплавов (ТПКММ) – 2003, с. 399-404.

[5] Малюгин С.В., Смирнов М.М., Давыдкин Н.В., Малюгин А.С. Использование полимерных композиционных материалов для обеспечения производства на предприятии авиадвигателестроения. // Теория и практика технологий производства изделий из композиционных материалов и новых металлических сплавов (ТПКММ) – 2003, с. 752-758.

[6] Способ изготовления крупногабаритной полимерной оснастки, №2375185 (RU), 2008124110 от 19.06.2008, 10.12.2009 Бюл. № 34, с. 1-2.

Сведения об авторе

Малюгин Алексей Сергеевич, начальник отдела ФГУП ММП «Салют»,
8 (499) 785-88-08.

Смирнов Михаил Михайлович, заместитель начальника отдела ФГУП ММП
«Салют», 8 (499) 785-88-08.