

## НОВЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ В СОВРЕМЕННОЙ ТЕХНОЛОГИИ НАМОТКИ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

---

Вадим Васильевич ВОРОБЕЙ родился в 1937 г. в городе Астрахани. Заведующий кафедрой МАИ. Доктор технических наук, профессор. Основные научные интересы — в области специальной технологии двигателей летательных аппаратов и энергетических установок. Автор более 300 научных работ. E-mail: k205@mai.ru

Vadim V. VOROBAY, D.Sci., was born in 1937, in Astrakhan. He is the Head of a Department at the MAI. His major research interests are in special technologies for aircraft engines and power plants. He has published over 300 technical papers. E-mail: k205@mai.ru

---

Сергей Владимирович ЕВСТРАТОВ родился в 1982 г. в городе Калининграде Московской области. Аспирант МАИ. Основные научные интересы — в области технологии специального машиностроения, современного двигателестроения. Автор пяти научных работ. E-mail: sergey.evstratov@gmail.ru

Sergey V. EVSTRATOV, was born in 1982, in the Moscow Region. He is a Postgraduate Student at the MAI. His research interests are in technologies for special engineering as well as for modern propulsion engineering. He has published 5 technical papers. E-mail: sergey.evstratov@gmail.ru

---

*В статье рассматриваются основные направления в технологии намотки нитяных конструкций из композиционных материалов. Приведены сведения о конструктивных особенностях автоматизированного оборудования, узлов хранения, пропитки и подготовки нитей, жгутов, лент и их комбинаций. На базе алгоритмов, базирующихся на понятиях геометрической сети или линии на поверхности, осуществляется проектирование основных параметров намотки слоистых конструкций, рассматриваются особенности построения алгоритма расчета исполнительных органов намоточного станка. Приводятся примеры составления программ намотки для ряда конструкций, представляющих тела вращения.*

*Major trends are discussed in winding technologies in regard to thread constructions made of composite materials. Some data are provided about design features of various automated equipment as well as storage, impregnation and preparation devices for threads, cords, belts and their combinations. A value selection for basic winding parameters of layer-built constructions is carried out using algorithms based on concepts of geometric net and line on the surface. Main features are revealed for an algorithm intended to develop executive devices of a winding machine. Some examples are presented for programs to support winding of various constructions shaped as a body of revolution.*

**Ключевые слова:** технология, намотка, нить, расчет, параметры, программы.

**Key words:** technology, winding, thread, computation, parameters, programs.

### 1. Общие положения

Получение конструкции методом намотки явилось подлинным прорывом в технологии производства изделий из полимерных КМ, что позволило получить высокопрочные и легкие изделия аэрокосмической и ракетной техники.

Намотка — технологический процесс, при котором непрерывный армирующий наполнитель в виде нитей, лент, жгутов, тканей, пленок пропитывается полимером-связующим, подается на оправку, имеющую конфигурацию внутренних поверхностей изделия, и укладывается на ее поверхности в заданном направлении. После получения необходи-

мой схемы армирования, заданной толщины и структуры материала производится отверждение изделия тем или иным способом и удаление оправки. Иногда оправка может быть элементом наматываемой конструкции, например герметизирующей оболочкой.

Методом намотки изготавливаются изделия, имеющие форму тел вращения: баллоны давления, баки, корпуса ракетных двигателей, головные части, отсеки ракет, транспортно-пусковые контейнеры, корпуса подводных аппаратов, стволы орудий и корпуса снарядов, жидконаливные цистерны, трубопроводные магистрали, коробчатые шпангоуты, воздухозаборники самолетов, лопасти винтов вертолетов, различные профили, пространственно изогнутые трубы и т.д.

Основным элементом перечисленных конструкций является силовая оболочка. Структура материала оболочки создается в результате намотки  $n$ -го количества слоев, которые образуют узор намотки, или схему армирования оболочки.

Технология изготовления изделий из КМ методом намотки имеет ряд преимуществ по сравнению с другими известными методами переработки композитов в изделиях. Важнейшим из этих преимуществ является, во — первых, возможность наиболее полной реализации в изделиях высокой прочности на растяжение волокон, составляющих намоточный материал, а во-вторых, возможность обеспечения высокой степени автоматизации процесса, изготовление изделий на станках с программным управлением.

Наиболее эффективна укладка волокон и нитей в направлении действия главных напряжений, появляющихся в материале, вследствие действия на изделие силовых нагрузок при условии, что эти волокна одинаково натянуты и прочно скреплены между собой. Одинаково натянутыми волокна оказываются лишь при намотке нитей на тела, имеющие выпуклую поверхность типа цилиндра, сферы, овалоида, изотензоида, тора и других им подобных, называемых телами вращения, поэтому технология намотки является наиболее применимой для этого класса изделий.

С развитием технологии все более актуальным становится вопрос о возможности использования высокопроизводительного метода намотки для изготовления сложнопрофильных элементов конструкций, в том числе элементов с изогнутой пространственной осью. С многочисленными конструкциями такого типа мы встречаемся в современных сверхзвуковых самолетах и ракетно-космической технике. В настоящее время в мировой практике нет опыта намотки таких конструкций, по-

скольку разработке технологических процессов их изготовления должны предшествовать в каждом конкретном случае разработка общей концепции создания конструкции, методов расчета и проектирования, специального технологического оборудования и оснастки для намотки с учетом всего предшествующего опыта.

Создание конструкции из волокнистых композиционных материалов неразрывно связано с одновременным созданием материала. Основные параметры получаемого композиционного материала зависят от соотношения между волокнистым и изотропным компонентами и рисунка укладки волокнистого материала в структуре создаваемой конструкции. То есть создание конструкций из волокнистых композиционных материалов неразрывно связано с одновременным созданием материала и технологий их изготовления. Причем технология изготовления конструкции существенно влияет на механические и физические характеристики получаемого композиционного материала и на конструктивные параметры создаваемого изделия.

Непрерывная намотка волокон (или ленты из волокон) производится на оправку, которая обычно имеет конфигурацию внутренней поверхности будущей конструкции. Волокна при намотке укладываются с некоторым натяжением, что обеспечивает «прямолинейность» волокон и плотную укладку. Как правило, намотка производится путем автоматической укладки волокон, что обеспечивает стабильность выходных прочностных, физических и геометрических параметров получаемой конструкции. Использование данного способа создания конструкций из композиционных материалов позволяет ставить задачи их оптимизации еще в процессе проектирования.

Следует сказать, что оптимизация или рациональное использование волокнистого материала предполагает и «оптимальный, или расчетный,» рисунок укладки и оптимальную конструктивную геометрию.

Как правило, метод намотки позволяет реализовать рисунки укладки волокон, находящихся в классе несоскальзывающих линий на поверхностях, описывающих форму будущего изделия. Такими линиями являются геодезические линии на поверхности либо линии на поверхности, отклоняющиеся от геодезических в пределах обеспечения за счет трения устойчивости наматываемой ленты на заданной физической поверхности.

## 2. Оборудование для намотки конструкций

Изготовление нитевых конструкций стало возможным после создания намоточных станков с

программным управлением. Автоматизированная непрерывная укладка (намотка) лент, прядей, жгутов армирующего материала обеспечивает при большой производительности максимальную реализацию прочностных и физических свойств используемых материалов в создаваемых изделиях.

По исходному состоянию наматываемой ленты различают «сухую» и «мокрую» намотки. Для сухой намотки используется заранее изготовленная (сформированная из определенного числа нитей определенной ширины и толщины, подсушенная и смотанная в бобины) лента. При мокрой намотке лента формируется из нитей (жгутов), пропитываемых связующим (как правило, полимерными смолами) в процессе намотки. При этом жгут в процессе намотки может менять форму поперечного сечения,

Станок, как правило, состоит из трех основных функциональных устройств: 1 — намоточное устройство, 2 — пропиточное устройство, 3 — устройство хранения и подготовки нитей (рис. 1). Типичные конструктивные схемы исполнения намоточных станков представлены на рис. 2—4. В зависи-

мости от схемы подготовки нитей возможны различные схемы исполнения станка.

На рис. 2 приведен намоточный станок, выполненный по схеме с выносным приводом вращения и стойкой закрепления оправки.

На рис. 3 — станок с вынесенным приводом вращения единой стойки закрепления оправки.

На рис. 4 — трехшпиндельный станок рамного типа.

Современные композиционные материалы обычно состоят из двух компонентов: *волокна* и *полимерной матрицы* (связующего). В качестве армирующих волокон обычно используется стекловолокна, органические, углеродные или другие волокна. Матрица является термореактивным материалом, таким, например, как полиэфирная или эпоксидная смола. При этом параметры материала в конструкции зависят от относительного и абсолютного соотношения между волокнистым и изотропным компонентами и рисунка укладки волокнистого материала. Определяющим при этом является технология пропитки волокон связующей матрицей.

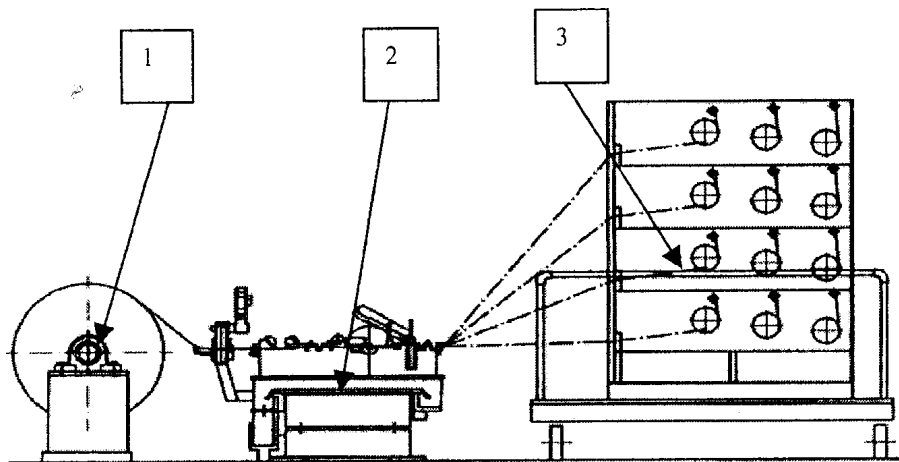


Рис. 1. Конструктивная схема намоточного станка

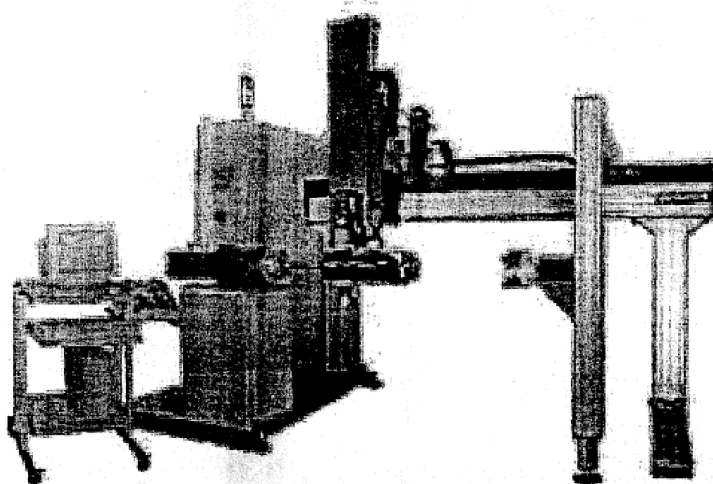


Рис. 2. Намоточный станок, выполненный по схеме с выносным приводом

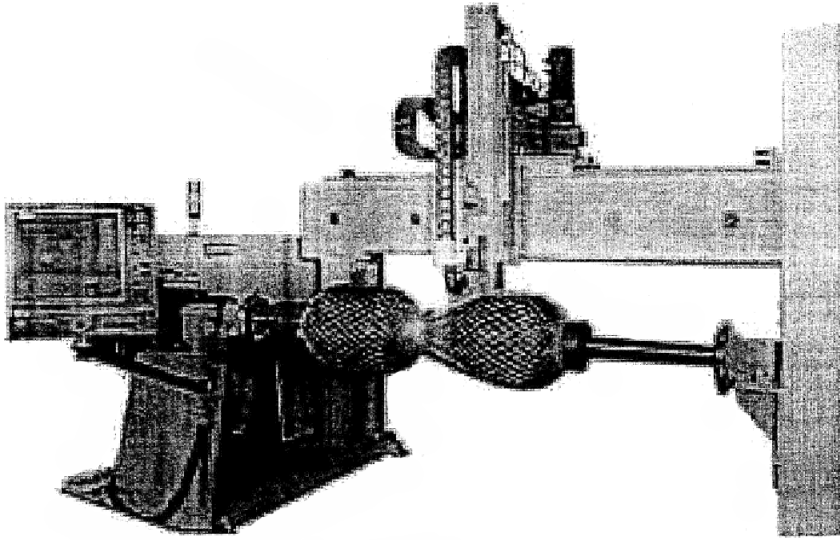


Рис. 3. Станок с вынесенным приводом вращения единой стойки закрепления оправки

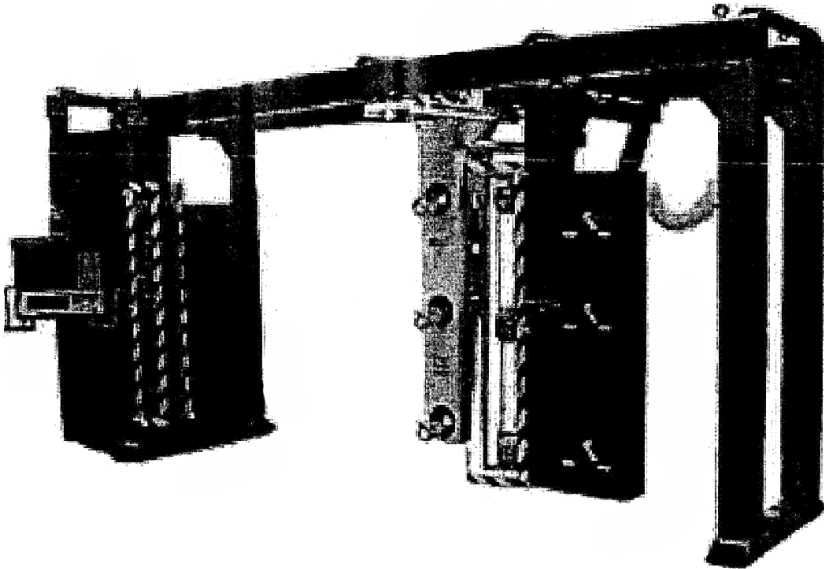


Рис. 4. Трехшпиндельный станок рамного типа

Используемые в ленте нити или жгуты состоят из многочисленных элементарных микроволокон, диаметр которых составляет от 6 до 20 микрон. Количество таких микроволокон в нити достигает порядка тысячи.

Поэтому в нити содержится большое количество микропор, которое составляет минимум 22% от объема нити. При пропитке основной задачей является замещение воздуха и влаги, находящихся в микропорах, используемым связующим. Из-за микроскопических размеров пор между волокнами в процессе замещения действуют законы капиллярного эффекта, для преодоления которого необходимо создание на нить высоких градиентов давлений. При этом наиболее целесообразно использовать связующие с низкими вязкостью и коэффициентом поверхностного натяжения.

Кроме того, при использовании метода намотки волокнистого материала происходит захват воздуха, в результате чего в структуре композита дополнительно образуются раковины и неоднородности, которые приводят к появлению локальных зон разрушения композита.

Поэтому для обеспечения стабильного качества композита принципиальным является выбор схемы пропитки связующим наматываемых нитей.

Известны различные способы решения отмеченных выше задач. Наиболее распространены способы и устройства, в которых для создания градиента давления используются барабаны и ролики различной конструкции и их модификации. Известны пропиточные устройства с использованием гидравлического напора связующего на нить. Известны решения, когда пропитка нитей произво-

дится с одновременным созданием градиента давления и вакуумированем. На рис. 5, 6 представлены типовые схемы и конструктивная реализация пропиточных устройств, используемые в приведенных выше конструкциях намоточных станков.

На рис. 5 представлена конструктивная схема пропитки барабанного типа (с одним барабаном), а на рис. 6 — пропитки роликового типа.

Следует отметить, что для каждого типа используемого волокнистого материала целесообразно подбирать и тип пропиточного устройства. Так, например, для высокомодульных угольных волокон недопустимы резкие перегибы. Поэтому в пропиточных устройствах для подготовки таких волокон используют принцип наименьшего изгиба волокон при их движении по пропиточному тракту (рис. 7).

Как правило, при намотке исполнительные органы намоточного станка движутся неравномер-

но, создавая переменные усилия натяжения в укладываемой ленте нитей. Такие неравномерные колебания усилия натяжения нитей приводят к некачественной пропитке и намотке. Для исключения данного отрицательного эффекта используют различного вида стабилизаторы и компенсаторы натяжения нитей, которые совмещаются с устройствами для хранения нитей (шпулярниками).

Для непосредственной укладки армирующих лент по заданным траекториям на оправке используют также различные конструктивные решения для исполнительных раскладывающих головок (рис. 8)

При намотке, как правило, формируют ленты из различных волокнистых наполнителей: нитей, жгутов, лент и их комбинаций. При этом, как уже отмечалось, используют различные волокнистые материалы: стеклонити, угольные, арамидные и

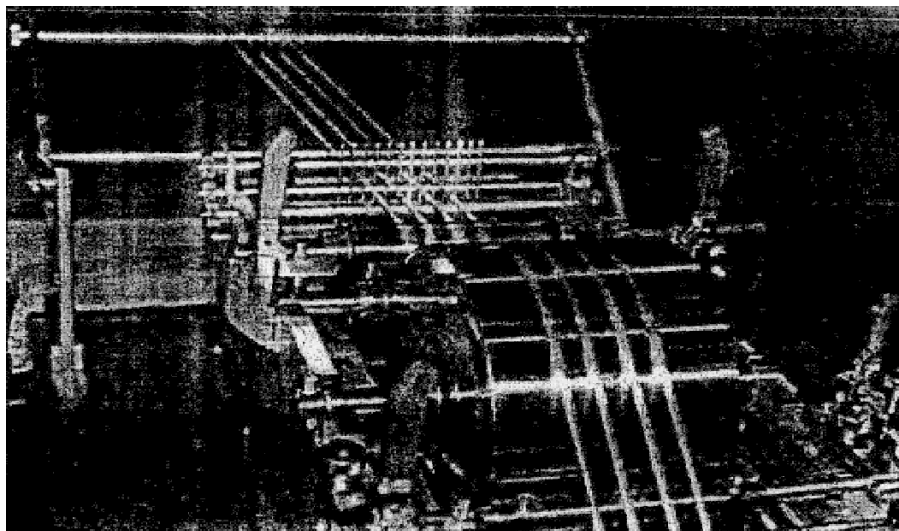


Рис. 5. Конструктивная схема пропитки барабанного типа (с одним барабаном)

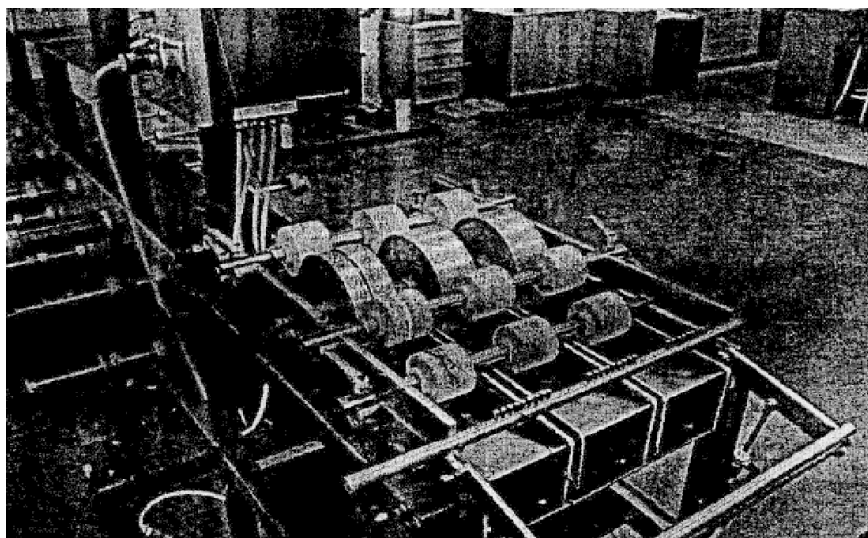


Рис. 6. Пропитка роликового типа

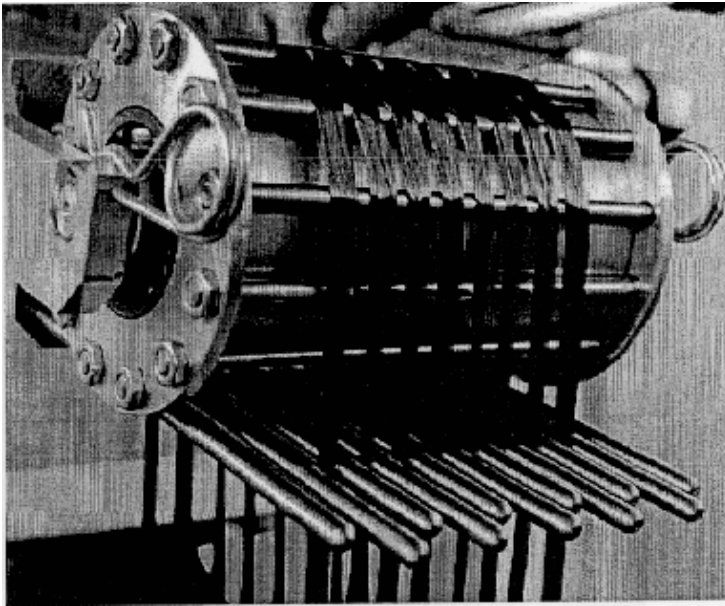


Рис. 7. Пропиточное устройство

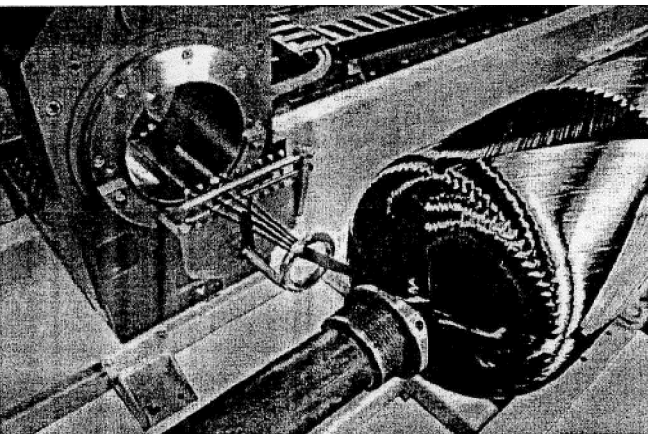


Рис. 8 Конструктивная схема исполнительных раскладывающих головок

другие нити. Данные наполнители, как правило, хранятся в виде специальных шпуль, с которых могут разматываться как с внешней стороны, так и изнутри. При этом для их размотки требуются различные устройства, компенсирующие инерционность шпуль при создании натяжения используемых при намотке лент. Требуется создание специальных устройств — шпулярников в намоточных станках, для размещения и формирования лент, используемых для пропитки и укладки по заданным траекториям (рис. 9).

Компенсация инерционных нагрузок на наматываемые нити в данных конструкциях реализуется с использованием тормозных двигателей по различным схемам.

Во всех представленных выше конструкциях станков для реализации укладки армирующих нитей или волокон по заданным траекториям на оп-

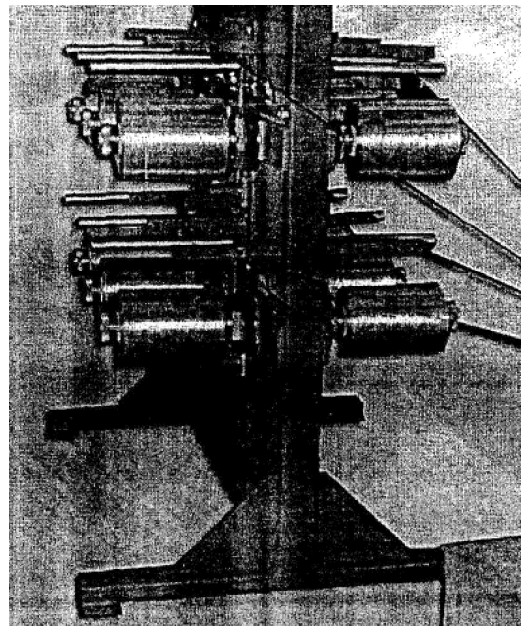


Рис. 9. Шпулярники

равках с поверхностями общего вида могут быть использованы следующие движения их исполнительных органов (рис. 10):

1) вращательное движение оправки (характеризуется угловой координатой  $\pm x$ );

2) поступательно-возвратное движение центра раскладочной головки вдоль оси вращения оправки (координата  $\pm y$ );

3) поступательно — возвратное движение центра раскладочной головки в плоскости, перпендикулярной оси вращения оправки (координата  $\pm z$ );

4) поступательно — возвратное движение центра раскладочной головки в плоскости, перпендикулярной оси вращения оправки (координата  $\pm w$ );

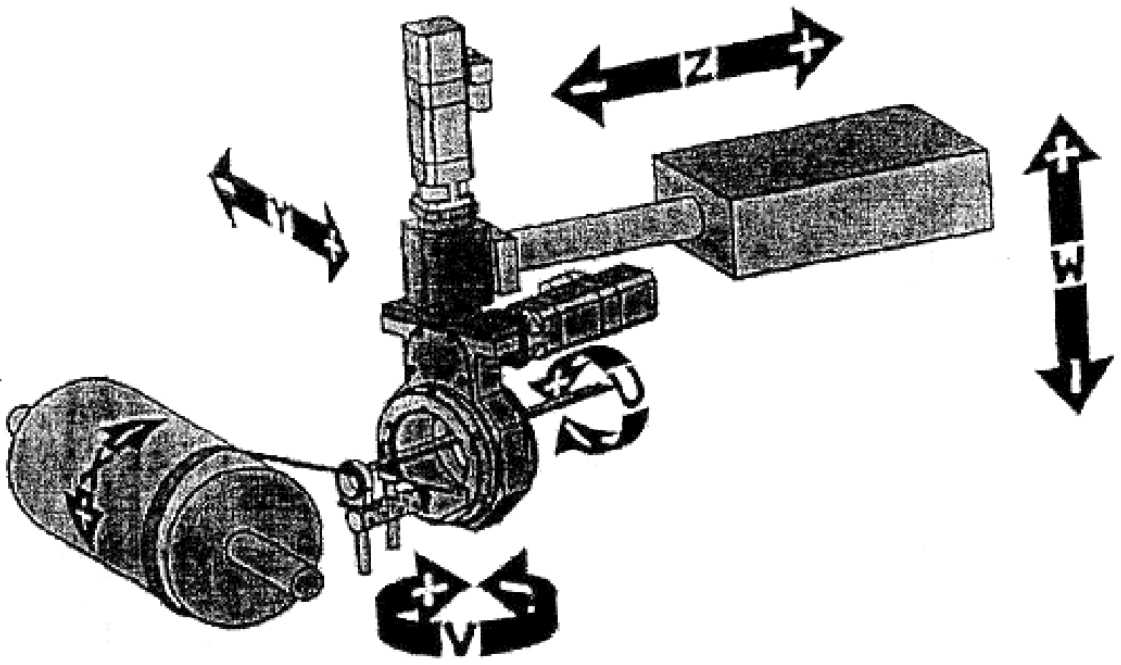


Рис. 10. Типы движений исполнительных органов станка

5) поворот раскладочной головки относительно оси  $z$  (координата  $\pm u$ );

6) поворот раскладочной головки относительно оси  $w$  (координата  $\pm v$ ).

На практике, наиболее распространенными схемами намоточных станков являются четырехкоординатные ( $\pm x, \pm y, \pm z, \pm u$  или  $w$ ) или трехкоординатные ( $\pm x, \pm y, \pm z$ ). Оболочки, создаваемые технологией намотки с использованием таких станков, являются, как правило, оболочками вращения, что ограничивает класс конструкций, в которых метод намотки может быть реализован. В общем случае, используя многокоординатные исполнительные органы современных намоточных станков, возможно реализовать намотку волокнистого материала фактически по любым траекториям на поверхности будущего изделия. Однако существует целый ряд ограничений геометрического и физического характера, которые существенно сужают возможности использования метода намотки при создании конструкций из композиционных материалов. Анализируя современные направления развития метода намотки, следует отметить, что деятельность большинства мировых производителей оборудования сконцентрировалась в двух направлениях:

— разработка универсальных станков (в основном для отработки новых изделий) с изменяемой геометрией рабочей зоны и максимальным оснащением станков дополнительными средствами намотки и выкладочными головками;

— разработка специальных станков (серийного производства) для изготовления изделий определенной геометрии и размеров.

В последних, как правило, используются стандартные узлы привода и управления, применяемые при создании различных намоточных устройств.

На рис. 11 представлен специальный намоточный станок WM2.800 (авторы Н.Г. Мороз и др.) для изготовления композитных оболочек баллонов давления объемом до 50 л. Работа станка полностью автоматическая: скорость вращения, движение раскладывающей головки, усилия в наматываемых волокнах, остановка работы определяются заложенной программой. Станок является частью устройства, содержащего непосредственно станок, специальный пропиточный тракт с использованием принципа гидрозамка и шпулярник. Станок обладает большой производительностью: время изготовления оболочек объемом 7 л и рабочим давлением 300 кг/см<sup>2</sup> — 5 мин, оболочки объемом 50 л и рабочим давлением 500 кг/см<sup>2</sup> — 8 мин.

### 3. Проектирование технологических процессов намотки

При создании конструкции из композиционных материалов широкое применение находят слоистые оболочки, каждый из слоев которых армирован волокнами (нитеями) в виде некоторых нитевых сетей. В автоматизированных производствах таких конструкций с поверхностями общего вида или поверхностями в виде тел вращения широкое применение находят алгоритмы, базирующиеся на по-

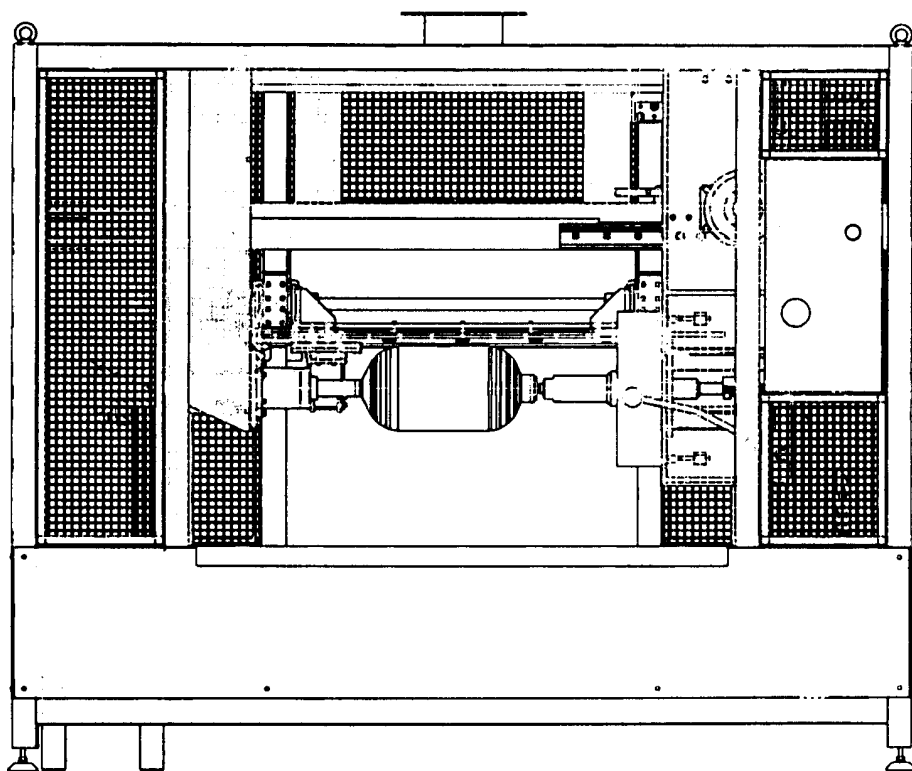


Рис. 11. Специальный намоточный станок WM2.800

нениях геометрической сети или линии на поверхности. Эти алгоритмы широко используются в геометрическом моделировании различных технологических процессов намотки [1].

Проектирование этих процессов сводится к расчету основных параметров процесса намотки. При намотке армирующих нитей на поверхность технологической оправки образуется некоторый рисунок, определяющий схему армирования будущего изделия. В качестве основных параметров, определяющих этот рисунок намотки оболочки в виде тела вращения, устанавливаются:

$\xi$  — угол охвата лентой из нитей оправки при одном возвратно-поступательном ходе раскладочной головки намоточного станка;

$m$  — заходность намотки, т.е. количество возвратно-поступательных движений головки(ролика) к моменту достаточно близкого замыкания траектории намотки;

$t$  — шаг намотки, определяющий смещение армирующей ленты по окружной координате поверхности(например, необходимое для равномерного покрытия армирующим материалом всей поверхности оправки).

Очевидно, что угол охвата  $\xi$ , заходность  $m$  и шаг  $t$  намотки (выраженный углом в радианах между соседними лентами в сечении с координатой  $z = \text{const}$ ) для обеспечения плотной намотки должны быть связаны между собой зависимостью

$$\xi m = 2\pi k \pm t,$$

где  $k$  — целое число.

Для обеспечения равномерного распределения лент по поверхности оправки шаг намотки  $t$  должен удовлетворять следующему равенству:

$$t = \frac{2\pi}{n},$$

где  $n$  — число витков ленты в одном слое намотки, реализуемое при условии их равномерного распределения в рассматриваемом сечении и всегда кратное числу  $m$ . Поэтому

$$\xi = \frac{2\pi}{m} \left( k \pm \frac{1}{n} \right).$$

Так как  $k, m, n$  — целые числа, угол охвата  $\xi$  является также дискретной величиной.

С другой стороны, теоретический угол охвата  $\xi = 2\Delta\phi$  зависит от формы поверхности оправки и траектории на ней, по которой укладывается лента армирующего материала, а также от параметров исполнительных органов намоточного станка и может быть определен в виде

$$\xi_0 = \xi_r + \xi_c,$$

где  $\xi_r$  — теоретический угол охвата траектории:



$$\xi_r = \int_0^s \frac{\sin \varphi}{\rho} ds \quad \text{или} \quad \xi_r = 2 \int_0^L \frac{\operatorname{tg}(1 + \rho^2)^{1/2}}{\rho} dz;$$

$\xi_c$  — поправка, вводимая при выборе параметров исполнительных органов станка.

Здесь приняты обозначения:  $\rho$ ,  $\varphi$  — соответственно радиус параллели оправки, угол между меридианом оправки и траекторией ленты (угол армирования);  $L$  — длина оправки (расстояние между точками касания краев оправки);  $S$  — длина одного витка армирующей ленты.

Необходимое число витков лент для образования слоя может быть назначено исходя из любых предположений, например из условия закрытия поверхности на определенном диаметре или из условия образования слоя на экваторе днища цилиндрического баллона с постоянной толщиной  $h_0$ .

Значение  $h_0$  может быть определено из условия постоянства объема используемых нитей в каждом сечении получаемой оболочки, выражаемого соотношением

$$n_0 = \frac{2\pi\rho_0 h_0 \cos \varphi_0}{2(F_l \pm \Delta)},$$

где  $F_l$  — площадь сечения ленты;  $\Delta$  — нахлест или зазор укладки лент, выраженный через долю площади сечения ленты. При этом число витков лент  $n_0$  округляется до ближайшего целого числа.

Необходимый угол  $\xi_0$  охвата лентой оправки, зависящий от заданного размера меридиана оправки и траектории намотки ленты, обычно не совпадает ни с одним из дискретных значений угла  $\xi$ . Варьируя значение  $n_0$  (или угол армирования, ширину и зазоры укладываемой ленты), можно подобрать целое  $n_0$ , близкое к  $n$ , и минимальные значения  $k$  и  $m$  так, чтобы полученное значение  $\xi_0$  отличалось от  $\xi$  не более чем на малую величину  $\lambda$ .

Таким образом, при заданном разбросе количества витков ленты в одном слое намотки  $n - n_0 = \Delta n$ , обусловленном параметрами слоя, для обеспечения достаточно равномерного покрытия оправки наматываемым слоем ленты и минимального отличия реализуемой при намотке траектории ленты от расчетной траектории должно выполняться условие  $|\xi - \xi_0| = \Delta\xi \leq \lambda$ .

Программные намоточные станки обычно имеют импульсное управление. Например, при одном импульсе на привод по координате поворота оправки она поворачивается на некоторый угол  $\Delta\beta$ , со-

ставляющий тысячные доли радиана. Аналогичные действия происходят и в приводах исполнительных органов станка по другим координатам.

В управляющей программе, обеспечивающей намотку на станке одного витка ленты, также должно содержаться целое число импульсов  $N$  или должна задаваться требуемая точность перемещения исполнительных органов. Таким образом, при выполнении программы можно достаточно точно подобрать значение угла охвата  $\xi$ , близкое к теоретическому.

В целом для обеспечения реализации исполнительной программы станка необходимо выполнение следующего.

Задаются серии ближайших целых значений  $\Delta\xi$  от нуля в положительную и отрицательную стороны. При заданных значениях  $\Delta\xi$  находятся серии минимальных значений  $m$  и  $n$ , таких, чтобы  $n$  минимально отличалось от  $n_0$  (при этом  $n$  и  $n_0$  округляются до целых чисел). Определяется серия минимальных значений  $\Delta\xi$  и  $\Delta n$ , из которых компромиссно выбирается пара  $\Delta\xi$  и  $\Delta n$ , удовлетворяющая как по углу охвата ( $\Delta\xi$ ), так и по числу витков ленты в слое намотки ( $\Delta n$ ). По выбранному значению  $\Delta\xi$  уточняется закон  $\varphi = \varphi(z)$  и другие параметры намотки или настройки исполнительных органов намоточного станка (в некоторых случаях может уточняться расчетная форма меридиана оправки  $\rho = \rho(z)$ ).

Таким образом, выполнение требования равномерного покрытия оправки при намотке слоя или любого другого требования приводит при реализации исполнительной программы станка к необходимости корректировки, в первую очередь, нулевых настроек исполнительных органов (положение и размеры раскладывающей головки, количество движений (координат) исполнительных органов и ряд других), расчетной траектории нити на оправке и т.д.

Для создания слоя в оболочке вращения подпрограмма намотки составляется для одного витка ленты. Намотка одного слоя осуществляется путем многократного повторения подпрограммы. Если намотка оболочки многослойная, тогда подпрограммы намотки составляются для одного витка каждого слоя с учетом его особенностей.

Оболочки вращения, изготовленные непрерывной намоткой по траектории одного витка, обеспечивающей равномерное покрытие лентой всей поверхности оправки, относятся к классу односемейных оболочек. Рисунок укладки лент на поверхно-

сти оболочки в этом случае обладает цилиндрической симметрией, т.е. каждый единичный участок линии параллели оболочки с координатой пересекает одинаковое количество лент. При полном покрытии оправки наматываемой лентой образуется двойной слой намотки, состоящий из моноотропного слоя левого вращения с углом укладки лент и моноотропного слоя правого вращения с углом (рис. 12). Ленты каждого моноотропного слоя равномерно распределены по поверхности оправки. Ленты моноотропного слоя левого вращения (на рис. 12 и 13 отмечены цифрой 1) регулярно пересекаются с лентами моноотропного слоя правого вращения, образуя на поверхности оболочки характерный рисунок намотки (рис. 13).

При продолжении намотки после полного покрытия оправки одним двойным слоем ленты образуется второй двойной слой и т.д. Многослойная ( $k$ -слойная) односемейная оболочка имеет регулярную слоистую структуру по толщине оболочки, состоящую из  $k$  двойных слоев намотки (рис. 13). Слои намотки укладываются в виде спиралей. Количество спиралей равно удвоенной заходности намотки  $m$ . Длина всех спиралей в одном слое одинаковая. Угол охвата одной спирали зависит от заходности  $m$  и числа намотанных слоев  $k$ .

При движении вдоль координаты  $z$  спирали смещаются по координате  $\xi$  (сохраняя свою угловую длину  $\xi_{sp} = \text{const}$ ) по закону  $d\xi = \pm \frac{\text{tg}\varphi}{\rho} dz$  соответственно для слоев правого и левого вращений. Суммарное смещение спиралей слоев правого

и левого вращений относительно друг друга

$$d\xi = 2 \frac{\text{tg}\varphi}{\rho} dz.$$

По мере продвижения спиралей слоев правого и левого вращений по координате  $z$  в определенных сечениях с координатами  $z_i$  происходит совпадение их концов. В этих сечениях происходит смена положения слоев правого и левого вращений: внутренний слой (лента внутреннего слоя) выходит наружу, а наружный слой уходит внутрь. При дальнейшем продвижении вдоль координаты  $z$  смена положения слоев повторяется. На поверхности оболочки места смены положения слоев имеют вид зубчатого рисунка, опоясывающего оболочку по ее широте (см. рис. 13). Два соседних зубчатых рисунка на поверхности оболочки находятся друг от друга на расстоянии  $\Delta z_i = z_{i+1} - z_i$ , на котором относительное угловое смещение спиралей слоев правого и левого вращений составляет

$$\frac{2\pi}{m} = 2 \int_{z_i}^{z_{i+1}} \frac{\text{tg}\varphi(1+\rho^2)^{1/2}}{\rho} dz.$$

Угол охвата лентой оправки  $\xi_0$  при замыкании рисунка намотки (при возвращении лент при намотке в исходную точку отсчета) можно определить по внешнему виду рисунка намотки с точностью до шага намотки  $t$  по зависимости  $\xi_0 = 2\pi(l+1) \pm t$ , где  $l$  — число пересечений на поверхности оболочки слоев правого и левого вращения (число зубчатых

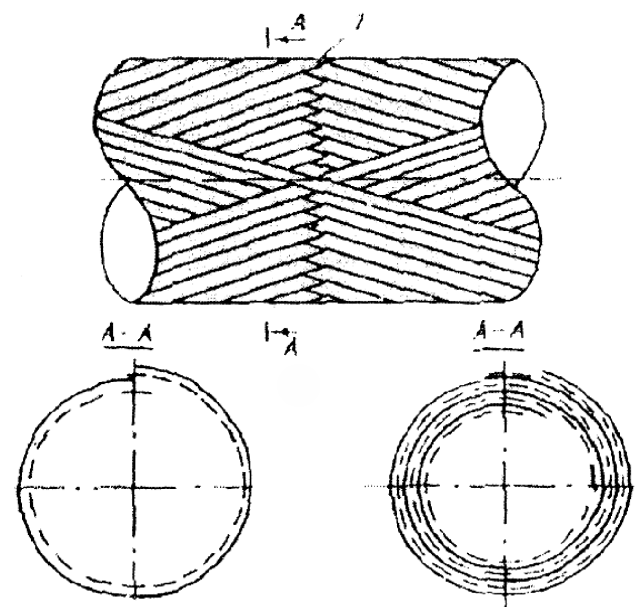


Рис. 12. Моноотропные слои левого и правого вращения с углом

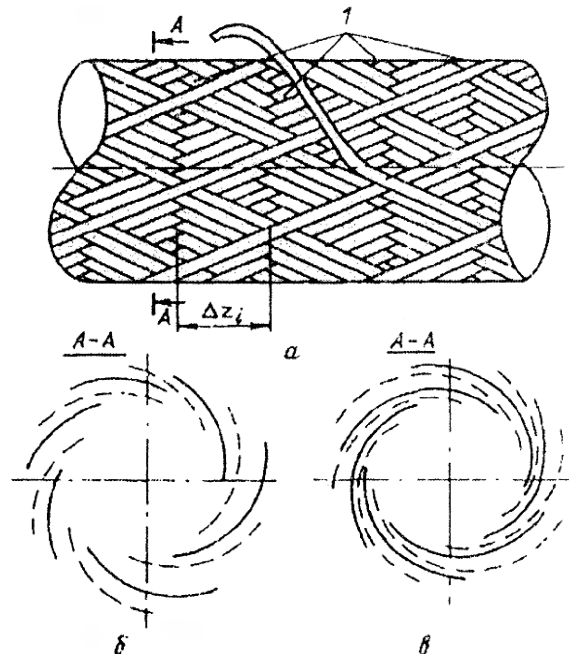


Рис. 13. Характерные рисунки намотки

поясов). За один цикл движения раскладочной головки (одно возвратно-поступательное движение

головки) лента охватит оправку на угол  $\xi = \frac{\xi_0}{m}$ .

#### 4. Особенности построения алгоритма расчета исполнительных органов станка

Для построения расчетной программы задается форма поверхности, на которой производится намотка нити. Форма поверхности может задаваться в произвольном виде: аналитически или в виде числового массива (таблично), в любой системе координат, связанной с частью рассматриваемой поверхности. В итоге задание формы приводится к некоему числовому массиву. Например, на рис. 14 представлен профиль образующей поверхности, состоящей из семи кривых. Для каждого вида кривой в локальной или глобальной системе координат задается числовой массив  $\{X_k(l), Y_k(l)\}$ , описывающий данный участок образующей. Число точек задания кривой рассматриваемого участка устанавливается заданием значения счетчика. В наиболее простом варианте задание формы изделия в виде тела вращения возможно путем объединения нескольких участков, описываемых каноническими поверхностями второго рода. В конечном итоге форма изделия приводится к некоему массиву в глобальной системе координат, связанной с выбранной точкой начала отсчета. Задание числовых значений массива производится в выбранных метрических единицах. Последующей операцией, автоматически выполняемой программой, является нормирование координат профиля образующей поверхности  $\{X_k(l) = X_k(l)/M, Y_k(l) = Y_k(l)/M\}$ . В качестве нормирующего множителя  $\{M\}$  выбирается наибольшее по модулю значение координат в глобальной системе координат. Например, в рассматриваемом случае (рис. 14) в качестве нормирующего

множителя  $\{M\}$  используется координата правого концевого сечения оболочки.

Следующим этапом работы программы является подпрограмма аппроксимации, полученной в виде матричного задания формы образующей с использованием известных интерполяционных процедур, например по методу Лагранжа или с использованием кубических сплайнов. В качестве контроля программа должна выдавать сравнение исходной заданной формы с ее интерполяционным вариантом описания.

Для реализации программы намотки задается желаемый закон намотки (закон укладки нити на поверхности) с указанием начальных и конечных точек траектории. Задаются некоторые технологические параметры (например, ширина используемой для рассматриваемого станка ленты, коэффициент трения, зависящий от типа используемого связующего и волокна, ограничения на пути, скорости и ускорения исполнительных органов станка, геометрия используемой раскладывающей головки и другие). На первоначальном этапе программа подбирает наиболее технологически выгодный вариант исполнения в виде числа заходности ленты и шага намотки для указанного варианта ширины ленты. Определяются угол охвата траектории и длина траектории на одном витке охвата. На основании расчетных значений угла охвата и длины траектории выбирается шаг движения по траектории на рассматриваемой поверхности. Как правило, шаг движения по траектории — величина постоянная, что позволяет реализовать намотку с постоянной скоростью движения армирующей ленты и совместить ее со скоростью пропитки ленты связующим. По известным зависимостям строятся траектории для каждого витка укладываемой ленты. Одновременно с данной процедурой проводится оценка устойчивости ленты на данной траектории с учетом геометрических и статических ограниче-

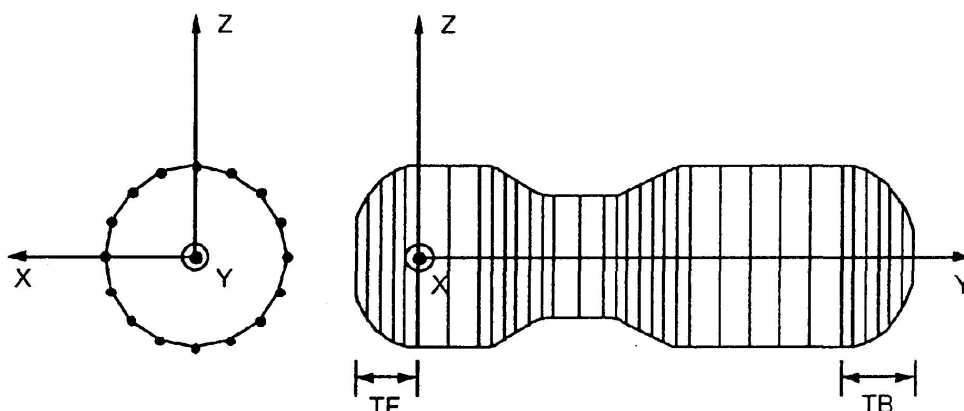


Рис. 14. Профиль образующей поверхности, состоящей из семи кривых

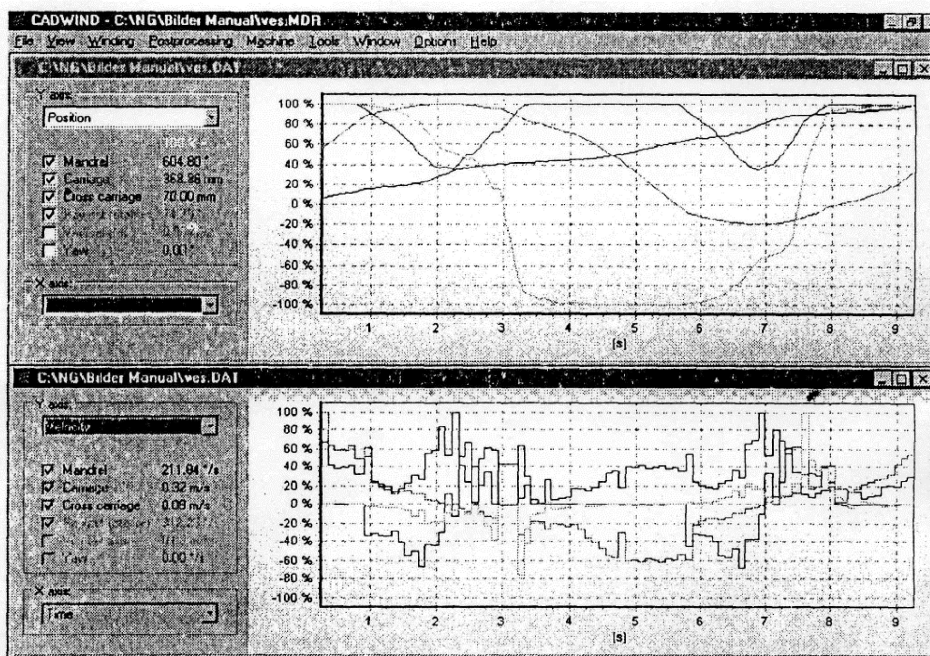


Рис. 15. Графическое представление процесса намотки

ний [1]. По полученным данным о траектории ленты на поверхности с учетом налагаемых ограничений для конкретно рассматриваемого станка строятся траектории движения исполнительных органов станка, которые в дальнейшем используются в виде числовых массивов для программ реализации в конкретном контроллере для данного станка.

В настоящее время одной из наиболее распространенных программ, реализующих алгоритм расчета траекторий намотки, является программный комплекс CADWIN. Данный комплекс обладает удобным для пользователя интерфейсом.

Для начала реализации проекта в меню выбирается закладка, где устанавливаются основные размеры геометрии оправки, на базе которых строится форма ее поверхности.

При удовлетворении аппроксимации желаемой формы задаются параметры наматываемого материала: количество жгутов, их ширина, соотношение связующего и волокнистого материала (коэффициент армирования), линейная и объемная плотности жгутов и связующего.

Выбирается тип намотки (спиральная, плоскостная или другая) и задаются некоторые параметры армирования, на базе которых представляется графическое изображение отдельных витков и наматываемого слоя на поверхности. При удовлетворении требований по покрываемости поверхности устанавливаются некоторые технологические ограничения на реализацию процесса намотки. В соответствии с данными ограничениями дается графическое представление процесса намотки с указанием перемещений, скоростей и ускорений движения

исполнительных органов станка (рис. 15). После некоторых коррекций пользователя (например, связывание нескольких подпрограмм в единую) получаемая информация заносится в виде отдельной программы в управляющую систему намоточного станка в принятой для нее системе команд, например M-кодов.

### Выводы

1. Рассмотрены основные направления в технологии намотки нитяных конструкций из композиционных материалов.
2. Приведены сведения о конструктивных особенностях современного автоматизированного намоточного оборудования, узлов хранения, пропитки и подготовки нитей, жгутов, лент и их комбинаций.
3. На базе алгоритмов, базирующихся на понятиях геометрической сети или линии на поверхности, разработаны методы расчета основных технологических параметров намотки. Приводятся примеры составления программ намотки для ряда конструкций, представляющих тела вращения.

### Библиографический список

1. Воробей В.В., Мороз А.Г. Технология непрерывной намотки нитью. — М.: Изд-во МАИ, 2007.
2. Буланов И.М., Воробей В.В. Технология аэрокосмических конструкций из композиционных материалов. — М.: Изд-во МГТУ им.Н.Э.Баумана, 1999.

Московский авиационный институт  
Статья поступила в редакцию 11.10.2008