

УДК621.3.034

DOI: 10.30838/J.PMNTM.2413.241219.42.599

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ СПОСОБОМ НАМОТКИ

ДИН КАЙ ЦЗЯН, *к. т. н.*

Кафедра технологии переработки неметаллических материалов, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «МАТИ – Российский государственный технологический университет имени К. Э. Циолковского», ул. Оршанская, 3, 121552, Москва, Россия, тел. +007 8962-955-2330, e-mail: kjding222@163.com

Аннотация. Развитие научно-технического прогресса в машиностроении, энергетике, авиакосмической и других отраслях промышленности немислимо без создания новых конструкционных материалов, способных улучшить важнейшие параметры двигателей, машин и механизмов, агрегатов, приборов, повысить их массовые показатели, надежность, срок службы изделий и снизить их материалоемкость. Изделия и агрегаты из полимерных композиционных материалов (ПКМ) могут быть получены различными способами. В промышленном производстве наибольшее распространение получили методы намотки и прессования. Прессование может осуществляться с использованием смеси предварительно нарубленного волокна и полимерного связующего. Одним из самых многообещающих методов формования изделий и агрегатов из разнообразного пластика выступает метод намотки волокном, за счет того, что он создает требуемую структуру наполнителя в фабрикатах в зависимости от их формы и особенностей эксплуатации. В статье описаны области эффективного применения полимерных композиционных материалов. Рассмотрены технологические возможности и области применения традиционных и новых разновидностей способа. Приведены результаты анализа перспектив развития технологий изготовления изделий и агрегатов из полимерных композиционных материалов с помощью метода сухой и мокрой намотки. Намотка осуществляется на оправку, установленную на станок с числовым программным управлением. Этот метод носит также название метода спиральной намотки. Изложены существующие подходы к разработке математических моделей созданных для изготовления сложнопрофильных элементов конструкций, в том числе изделий и агрегатов с изогнутой пространственной осью.

Ключевые слова: полимерный композиционный материал (ПКМ); намотка; прессование; волокно; схема армирования; препрег

ОСНОВНІ НАПРЯМКИ ВДОСКОНАЛЕННЯ РОЗВИТКУ ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ ВИРОБІВ ІЗ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ СПОСОБОМ НАМОТУВАННЯ

ДИН КАЙ ЦЗЯНЬ, *к. т. н.*

Кафедра технології переробки неметалічних матеріалів, Федеральна державна бюджетна освітня установа вищої професійної освіти «МАТИ – Російський державний технологічний університет імені К. Е. Ціолковського», вул. Оршанська, 3, 121552, Москва, Росія, тел. +007 8962-955-2330, e-mail: kjding222@163.com

Анотація. Розвиток науково-технічного прогресу в машинобудуванні, енергетиці, авіакосмічній та інших галузях промисловості немислими без створення нових конструкційних матеріалів, здатних поліпшити найважливіші параметри двигунів, машин і механізмів, агрегатів, приладів, підвищити їх масові показники, надійність, термін служби виробів і знизити їх матеріаломісткість. Вироби і агрегати з полімерних композиційних матеріалів (ПКМ) можна отримати різними способами. У промисловому виробництві найбільшого поширення набули методи намотування і пресування. Пресування може здійснюватися з використанням суміші попередньо нарубаного волокна і полімерного сполучного. Одним із найбільш багатобічних методів формування виробів і агрегатів з різноманітного пластика виступає метод намотування волокном, за рахунок того, що він створює необхідну структуру наповнювача у фабрикатів залежно від їх форми й особливостей експлуатації. У статті описано сфери ефективного застосування полімерних композиційних матеріалів. Розглянуто технологічні можливості і галузі застосування традиційних і нових різновидів способу. Наведено результати аналізу перспектив розвитку технологій виготовлення виробів і агрегатів з полімерних композиційних матеріалів за допомогою методу сухого та мокрого намотування. Намотування здійснюється на оправлення, встановлене на верстат із числовим програмним управлінням. Цей метод має також назву методу спірального намотування. Викладено існуючі підходи до розроблення математичних моделей, створених для виготовлення складнопрофільних елементів конструкцій, в тому числі виробів і агрегатів з вигнутою просторовою віссю.

Ключові слова: полімерний композиційний матеріал (ПКМ); намотування; пресування; волокно; схема армування; препрег

MAIN DIRECTIONS OF IMPROVING THE DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY FOR MANUFACTURING PRODUCTS FROM POLYMER COMPOSITE MATERIALS BY THE METHOD OF WINDING

DING KAI JIAN, *Cand. Sc. (Tech.)*

Department of Processing Technology of Non-metallic Materials, State Educational Institution of Higher Professional Education "Moscow Aviation Technology Institute – Russian State Technological University named after K.E. Tsiolkovsky", 3, Orshanskaya St., Moscow, 121552, Russia, tel. +007 8962-955-2330, e-mail: kjding222@163.com

Abstract. The development of scientific and technological progress in mechanical engineering, energy, aerospace and other industries is unthinkable without the creation of new structural materials that can improve the most important parameters of engines, machines and mechanisms, assemblies, devices and increase their mass performance, reliability, service life of products and reduce their material consumption. Products and aggregates from polymer composite materials (PCM) can be obtained in various ways. In industrial production, the most widely used method of winding and pressing. Pressing can be carried out using a mixture of preliminarily fiber and a polymer binder. One of the most promising methods of forming products and assemblies from a variety of plastic is the method of winding with fiber, due to the fact that it creates the required filler structure in the factories depending on their shape and operation characteristics. All areas of effective use of polymer composite materials are reflected. This article discusses the technological capabilities and applications of traditional and new varieties of the method. Even, the results of an analysis of the prospects for the development of manufacturing technologies for products and aggregates from polymer composite materials using the winding method are presented. There are methods of dry and wet winding. Consider these winding methods. Winding is carried out on a mandrel mounted on a machine with numerical control. This method is also called the spiral winding method. Existing approaches to the development of mathematical models are described and created for the manufacture of complex structural elements, including products and an assembly with a curved spatial axis, and so on.

Keywords: composite polymeric material; winding; pressure; fibre; reinforcing scheme; prepreg

Введение

В настоящее время композиционные материалы, использующиеся при изготовлении изделий в современном машиностроении, по различным оценкам составляют от 1,5 до 2 %. В большинстве промышленно и индустриально развитых стран этот показатель равен 10...15 %. Лидерами в разработке технологий и производстве оборудования для изготовления композиционных материалов на сегодняшний день являются США, Германия, Франция, Россия, Китай и Великобритания. По прогнозам, ежегодный рост потребления композиционных материалов в авиастроении составит 8 %, а в автомобилестроении – 6 %. Сегодня для многих стран производство изделий из композиционных материалов стало важнейшей отраслью промышленности. Например, зарубежные компании и корпорации-инвесторы широко используют композиционные материалы в судостроении (для изготовления катеров и яхт), авиации (корпусные детали самолетов, вертолетов, беспилотных аппаратов), энергетике (ветрогенераторы), автомобилестроении (корпусные детали, тюнинг, выпускной клапан), строительстве (отделочные материалы, сантехника), промышленности и индустрии (трубы, емкости, баллоны) [1; 2].

Технология изготовления изделий из полимерных композиционных материалов способом намотки известна с 50-х годов прошлого века. За это время

способ существенно развился, что позволило получить высокопрочные и легкие изделия и агрегаты, главным образом, для аэрокосмической и ракетной техники. Намотка – технологический процесс, при котором непрерывный армирующий наполнитель в виде нитей, лент, жгутов или тканей пропитывается связующим веществом, подается на оправку, имеющую конфигурацию внутренней поверхности изделия и агрегата, и укладывается на оправку в заданном направлении. После получения необходимой толщины и структуры материала при заданной схеме армирования производится отверждение изделия и удаление оправки. Форма оправки (круг, треугольник, прямоугольник, эллипс) определяет форму изделия и агрегата. В некоторых случаях оправка может быть элементом наматываемой конструкции – внутренней герметизирующей оболочкой [3; 4].

Методом намотки чаще всего изготавливаются изделия и агрегаты, имеющие форму тел вращения: корпуса ракет и элементы конструкции ракетных двигателей, корпуса подводных аппаратов, стволы орудий и корпуса снарядов, баллоны, цистерны, баки, трубы, шпангоуты, воздухозаборники, лопасти винтов и другие изделия и агрегаты.

Способ намотки имеет несколько разновидностей. Для намотки трубчатых изделий сравнительно небольшого диаметра применяют способ поворотных столов. Он используется для изготовления удилищ, рукояток клюшек для игры в гольф и других трубчатых изделий. Тканевый препрег на основе

углеродных волокон раскраивают на заготовки нужной формы, устанавливают на стол цилиндрическую оправку, помещают препрег в зазор между столом и оправкой и наматывают его на оправку, используя относительное движение столов. Намотанный препрег с оправкой отверждают в термошкафу и на специальной машине (кабестан), а затем извлекают оправку из готовой трубы. Технологический процесс достаточно прост и производителен. Его недостаток – невозможность формирования труб большого диаметра [5].

Изделия с наиболее высокими деформационно прочностными характеристиками получают способом намотки нитями. Этот способ в зависимости от исходного состояния наполнителя имеет две разновидности – сухую и мокрую намотки. В первом случае для намотки используются препреги в виде нитей, жгутов или лент. Во втором случае пропитка армирующих волокон связующим веществом ведется непосредственно в процессе намотки. В качестве армирующего наполнителя используются стеклянные, углеродные и органические волокна.

Способ сухой намотки характеризуется отсутствием операции пропитки. Вместо ровинга используются бобины с препрегом. Нагревательные устройства нагревают связующее вещество, нанесенное на волокнистый наполнитель, и переводят его в вязкотекучее состояние. При сухой намотке в зоне формования создается повышенное контактное давление. Использование препрега, который может храниться длительное время, позволяет более точно задавать соотношение наполнитель – связующее, упрощает создание гибридных композитов и улучшает экологические показатели производства.

Недостатки способа сухой намотки заключаются в наличии остаточного растворителя в связующем веществе, что является причиной снижения свойства получаемых изделий. При этом за счет использования растворителей существенно расширяется номенклатура связующих веществ, которая включает фенолоформальдегидные, эпоксиднофенольные, эпоксидные, полиамидные и другие смолы. Формование изделия и агрегата происходит при температуре оправки выше температуры плавления связующего. В объеме композита возможно наличие пор, вызванных неполной пропиткой наполнителя связующим веществом, в особенности это касается волокон с развитой свободной поверхностью [6–8].

При мокрой намотке операции пропитки волокон и формования изделия и агрегата совмещены в одном технологическом процессе. Ровинг сматывается с бобин, собирается в жгут и пропитывается, проходя через ванну с жидким связующим веществом. Избыток связующего вещества возвращается отжимными вальками. Ванна и бобины с волокном размещены на каретке, которая совершает возвратно – поступательное перемещение относительно

вращающейся оправки. Соотношение скоростей относительных движений определяет шаг намотки и ориентацию волокна на оправке. Усилиями на прижимных вальках регулируют количество связующего вещества, остающегося на жгуте после пропитки. Натяжением жгута создают требуемую плотность намотки. По мере возрастания толщины изделия соотношение скоростей должно корректироваться в соответствии со схемой армирования. Это обстоятельство определяет необходимость изготовления изделий на станках с ЧПУ и получение изделий с более стабильными свойствами.

Способ мокрой намотки позволяет получать высокопрочные монолитные изделия и агрегаты. Однако невозможность применения растворителей обуславливает технологические сложности при обеспечении требуемой вязкости связующего вещества. Вязкотекучее состояние связующего вещества должно сохраняться, как минимум, в течение цикла формования одного изделия и агрегата. Причиной больших потерь связующего вещества является его отжим при контакте с элементами намоточного узла. В способе мокрой намотки используют связующие вещества низкой вязкости: ненасыщенные полиэфир, сложные виниловые эфиры, низкомолекулярные эпоксидные смолы.

Намотка волокнистого материала на оправку сопровождается захватом воздуха, что приводит к образованию раковин и неоднородностей в объеме композита и созданию локальных зон разрушения. Ленты, нити и жгуты состоят из многочисленных элементарных микроволокон, которые содержат большое количество микропор. Поэтому основной задачей пропитки является замещение связующим веществом воздуха и влаги, находящихся в микропорах. Заполнение микропор происходит по законам капиллярного эффекта, для преодоления которого необходимо создание в капилляре градиента давления. Для улучшения пропитки волокон наиболее целесообразно использовать связующие с низкими вязкостью и коэффициентом поверхностного натяжения. Решение этой проблемы принципиально для обеспечения стабильного качества композиционного материала.

В зависимости от типа укладки армирующего материала в намотанном изделии различают несколько технологических схем намотки (схем армирования): прямая окружная, спирально-винтовая, спирально-кольцевая, продольно-поперечная, спирально-перекрестная, планарная и др. Указанные схемы армирования хорошо изучены и применяются для изготовления намотанных изделий с заранее заданными свойствами.

Теоретически возможно реализовать намотку волокнистого материала по любым траекториям на поверхности изделия. На практике существуют ограничения, которые сужают возможности способа намотки при создании сложнопрофильных изделий и

агрегатов из композиционных материалов. В целом намотка позволяет реализовать траектории укладки волокон, находящихся в классе несоскальзывающих линий на поверхностях будущего изделия и агрегата. Такими линиями, как правило, являются геодезические линии на поверхности изделия, а также линии, отклоняющиеся от геодезических в пределах обеспечения сил трения между волокнами. Оптимизация использования волокнистого материала предполагает оптимальную геометрию укладки волокон на заданной поверхности.

Имеется специализированное оборудование, предназначенное для осуществления той или иной технологической схемы намотки. Совершенствование оборудования для намотки композиционных материалов у большинства мировых производителей идет в двух основных направлениях: разработка универсальных станков с максимальным оснащением дополнительными средствами намотки и изменяемой геометрией рабочей зоны.

В настоящее время актуальной задачей является использование способов намотки, примеры которых показаны на рисунках 1–3. Многочисленные конструкции такого типа существуют в современных самолетах и ракетно-космической технике. В мировой практике пока нет опыта намотки таких конструкций, поскольку разработке технологического процесса изготовления сложнопрофильных конструкций должен предшествовать целый комплекс научных, конструкторских, технологических и расчетных работ.

Разработка сложнопрофильных конструкций должна начинаться с построения общей концепции изделия и агрегата, включая методы расчета и проектирования специального технологического оборудования и оснастки для намотки. Технология изготовления изделия и агрегата существенно влияет на физико-механические характеристики композита и конструктивные параметры создаваемого изделия и агрегата [9–11].



Рис. 1. Модель изделия с изогнутой осью /
Fig. 1. Curved Axis Product Model



Рис. 2. Модель сложнопрофильного изделия /
Fig. 2. Model of a complex product



Рис. 3. Модель выпукло-вогнутого изделия /
Fig. 3. Convex Concave Product Model

В настоящее время разрабатываются новые способы и области применения технологии намотки. Способ раздельного формования изделий из композиционных материалов намоткой представляет собой технологически обратный процесс. Сначала наматывают заготовку из волокнистого материала, а затем пропитывают ее в замкнутой форме с использованием давления или вакуума. Технологическими параметрами этого процесса являются: плотность намотанной заготовки, время, давление и температура пропитки. Использование замкнутой формы позволяет повысить качество наружной поверхности изделий и агрегатов. Способ представляется весьма перспективным, поскольку совмещает достоинства намотки и инъекционного прессования.

Способ непрерывного изготовления длинномерных сложноармированных изделий и агрегата из полимерных композиционных материалов сочетает протягивание и намотку спирального слоя. Полученное изделие и агрегатов имеет многонаправленную армированную структуру, при этом внутренний слой изделия и агрегата состоит из одноосно-ориентированных волокон, а наружный слой – из спирально-ориентированных волокон. Сплошные и полые изделия и агрегаты имеют уникальный набор физико-механических характеристик.

Характеризуя текущее состояние отрасли композиционных материалов в целом, необходимо

констатировать, что отставание отечественных компаний и корпораций от крупных иностранных производителей сырья и оборудования для композиционных материалов слишком велико. Сегодня необходимо осваивать тот сегмент рынка композиционных материалов, который еще не занят,

реализуя разработки технологий и оборудования намотки для машиностроения, металлургии, нефтегазодобывающей, химической и перерабатывающей отраслей промышленности и индустрии.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. <http://ucci.ur.ru/press-center/news/yr2010/mn6/dy22/46>
2. http://www.matrasurcomposites.com/articles/kompositny_mir_2008.pdf
3. Технология ракетных и аэрокосмических конструкционных материалов : монография / [И. М. Буланов, В. В. Воробей]. – Москва : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1998. – 516 с.
4. Воробей В. В. Новые направления в современной технологии намотки конструкций из композиционных материалов / В. В. Воробей, С. В. Евстратов // Вестник МАИ. – 2009. – Т. 16. – № 1. – С. 61–72.
5. Углеродные волокна / Под ред. С. Симамуры : пер. с япон. – Москва : Мир, 1987. – 304 с.
6. Григорьев С. Н. Перспективы развития распределенных гетерогенных систем ЧПУ децентрализованными производствами / С. Н. Григорьев, Г. М. Мартинов // Автоматизация в промышленности. – 2010. – № 5. – С. 4–8.
7. Grigoriev S. Broad fast neutral molecule beam sources for industrial – scale beam – assisted deposition / S. Grigoriev, Yu. Melnik, A. Metel // Journal of Surface and Coating Technology. – 2002. – Vol. 156. – № 1–3. – Pp. 44–49.
8. Григорьев С. Н. Компактный источник пара материала проводящей мишени, распыляемой ионами с энергией 3 кэВ при давлении 0,05 Па / С. Н. Григорьев, Ю. А. Мельник, А. С. Метель, В. В. Панин, В. В. Прудников // Приборы и техника эксперимента. – 2009. – № 5. – С. 127–133.
9. Григорьев С. Н. Разработка технологии нанесения износостойких покрытий на режущий инструмент на основе минералокерамики и кубического нитрида бора / С. Н. Григорьев, В. Г. Боровский // Обработка металлов: технология, оборудование, инструменты. – 2003. – № 3. – С. 5–6.
10. Григорьев С. Н. Источник широкого пучка быстрых атомов, получаемых при перезарядке ионов, ускоряемых между двумя областями, заполненными плазмой / С. Н. Григорьев, Ю. А. Мельник, А. С. Метель, В. В. Панин // Приборы и техника эксперимента. – 2009. – № 4. – С. 166–172.
11. Метель А. С. Заполнение рабочей камеры технологической установки одноородной плазмой с помощью стационарного тлеющего разряда / А. С. Метель, С. Н. Григорьев, Ю. А. Мельник, В. В. Панин // Физика плазмы. – 2009. – Т. 35. – № 12. – С. 1140–1149.

REFERENCES

1. <http://ucci.ur.ru/press-center/news/yr2010/mn6/dy22/46>
2. http://www.matrasurcomposites.com/articles/kompositny_mir_2008.pdf
3. Bulanov I.M. and Sparrow V.V. *Tekhnologiya raketnykh i aerokosmicheskikh konstruksionnykh materialov* [Technology of rocket and aerospace structural materials]. Moscow : Publishing House of MSTU named after N.E. Bauman, 1998, 516 p. (in Russian).
4. Vorobey V.V. and Evstratov S.V. *Novyye napravleniya v sovremennoy tekhnologii namotki konstruksiy iz kompozitsionnykh materialov* [New directions in the modern technology of winding structures from composite materials]. *Vestnik MAI* [MAI Bulletin]. 2009, vol. 16, no. 1, pp. 61–72. (in Russian).
5. *Uglerodnyye volokna* [Carbon Fiber]. Edited by S. Simamura: Per. with Japanese. Moscow: Mir, 1987, 304 p. (in Russian).
6. Grigoryev S.N. and Martinov G.M. *Perspektivy razvitiya raspredelennykh geterogennykh sistem CHPU detsentralizovannymi proizvodstvami* [Prospects for the development of distributed heterogeneous CNC systems by decentralized industries]. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti* [Automation in Industry]. 2010, no. 5, pp. 4–8. (in Russian).
7. Grigoriev S., Melnik Yu. and Metel A. Broad fast neutral molecule beam sources for industrial – scale beam – assisted deposition. *Journal of Surface and Coating Technology*. 2002, vol. 156, no 1–3, pp. 44–49.
8. Grigoriev S.N., Melnik Yu.A., Metel A.S., Panin V.V. and Prudnikov V.V. *Kompaktnyy istochnik para materiala provodyashchey misheni, raspylyayemoy ionami s energiyei 3 keV pri davlenii 0,05 Pa* [A compact source of steam of the material of a conducting target sputtered by ions with an energy of 3 keV at a pressure of 0.05 Pa]. *Pribory i tekhnika eksperimenta*. [Instruments and experimental technique]. 2009, no. 5, pp. 127–133. (in Russian).
9. Grigoryev S.N. and Borovsky V.G. *Razrabotka tekhnologii naneseniya iznosostoykikh pokrytiy na rezhushchiy instrument na osnove mineralokeramiki i kubicheskogo nitrida bora* [Development of technology for applying wear-resistant coatings on cutting tools based on mineral ceramics and cubic boron nitride]. *Obrabotka metallov: tekhnologiya, oborudovaniye, instrumenty* [Metal processing: technology, equipment, tools]. 2003, no. 3, pp. 5–6. (in Russian).
10. Grigoryev S.N., Melnik Yu.A., Metel A.S. and Panin V.V. *Istochnik shirokogo puchka bystrykh atomov, poluchayemykh pri perezaryadke ionov, uskoryayemykh mezhdu dvumya oblastyami, zapolnennymi plazmoy* [Source of a wide beam of fast atoms obtained by recharging ions accelerated between two regions filled with plasma]. *Pribory i tekhnika eksperimenta* [Instruments and experimental technique]. 2009, no. 4, pp. 166–172. (in Russian).
11. Metel A.S., Grigoryev S.N., Melnik Yu.A. and Panin V.V. *Zapolneniye rabochey kamery tekhnologicheskoy ustanovki odnoorodnoy plazmoy s pomoshch'yu statsionarnogo tleyushchego razryada* [Filling the working chamber of a technological installation with a uniform plasma using a stationary glow discharge]. *Fizika plazmy* [Plasma Physics]. 2009, vol. 35, no. 12, pp. 1140–1149. (in Russian).

Поступила в редакцию 05.11.2019.