

УДК 678.02

DOI 10.47367/0021-3497_2022_4_234

**ИННОВАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ АДГЕЗИВНОЙ СБОРКИ
ИЗДЕЛИЙ ПЕРЕМЕННОГО СЕЧЕНИЯ***

**INNOVATIVE ADHESIVE ASSEMBLY TECHNOLOGY
OF PRODUCTS WITH VARIABLE CROSS-SECTION**

Р.М. СУБХАНКУЛОВ, А.В. ИГНАТОВ

R.M. SUBKHANKULOV, A.V. IGNATOV

(Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана)

(Moscow State Technical University named after N. E. Bauman (National Research University))

E-mail: ttp@ivgpu.com

В статье предложен инновационный технологический метод, позволяющий автоматизировать процесс адгезивной сборки многослойных изделий из полимерных композиционных материалов с наиболее сложной геометрической конфигурацией. Метод реализуется с использованием технологической оснастки оригинальной конструкции. Целью исследования является разработка методики проектирования средств технологического оснащения, обеспечивающих заданные эксплуатационные показатели изделий. Методика позволяет последовательно рассчитывать режимы работы составных частей оснастки и выявлять граничные условия их применения. Представлен общий вид прототипа, созданного с применением методики, реализующий прорывной технологический метод.

The article proposes an innovative technological method that allows automating the adhesive assembly process of multilayer products made of polymer composite materials with the most complex geometric configuration. The method is implemented using technological equipment of the original design. The purpose of the study is to develop a methodology for designing technological equipment that provides the specified performance indicators of products. The methodology makes it possible to sequentially calculate the modes of operation of the component parts of the tooling and to identify the boundary conditions for their use. A general view of a prototype created by using a technique that implements a breakthrough technological method is presented.

* НИОКР по теме: “Разработка, изготовление, испытания и доработка прототипа оборудования для бесконтактной выкладки изделий из полимерных композиционных материалов, разработка и исследование образцов композиционных изделий” Выполняется при финансовой поддержке Фонда содействия инновациям.

Ключевые слова: машиностроение, полимер, обогрев, технология, автоматизация, сборка.

Keywords: mechanical engineering, polymer, heating, technology, automation, assembly.

В современном производстве наметился запрос на замещение классических природных материалов на полимерные композиционные. Преимущество заключается в снижении веса конструкции, повышении прочности, надежности, ресурса, других потребительских качеств. Особое место среди полимерных композиционных материалов занимают материалы, армированные так называемыми волокнами «бесконечной» длины. Они состоят из полимерной матрицы – обычно терморезистивная эпоксидная смола, и армирующего материала – однонаправленное волокно или ткань. Применение таких материалов при изготовлении ответственных изделий позволяет создавать умные конструкции с направленными свойствами (прочностными, деформационными), наиболее полно отвечающими условиям эксплуатации. Классические изотропные материалы не дают такой возможности [1].

Наиболее эффективно возможности композиционных материалов, армированных непрерывными волокнами, могут быть использованы при изготовлении изделий, у которых рабочий наружный профиль является одновременно несущим (изделия без силового каркаса): лопасти вертолетов, ветряков, градирен, лопасти турбин, винты судов и т.д. Применение композитов позволяет создавать изделия, у которых рабочий профиль при приложении эксплуатационных нагрузок деформируется таким образом, чтобы оптимально отвечать условиям работы, без снижения эффективности.

В общем случае технология изготовления композитных изделий, армированных непрерывными волокнами, состоит в следующем:

1) на подготовительном этапе – изготовление формообразующей оправки, определяющей форму изделия, а также нанесение на формообразующие поверхности оправки антиадгезионного состава для того, чтобы

после отверждения изделие не приклеилось к оправке;

2) приготовление полимерного связующего (совмещение основы, отвердителя и других модифицирующих компонентов) и пропитка им волокнистого наполнителя;

3) послойная укладка армирующего наполнителя на оправку в соответствии со схемой так, чтобы направление действия главных напряжений совпадали с направлением волокна (или основы для тканых наполнителей). Укладка должна сопровождаться тщательной прикаткой слоев пропитанного волокнистого наполнителя контактным роликом. Это необходимо для того, чтобы из структуры устранить пузыри воздуха, обеспечить плотную укладку слоев и получить монолитную конструкцию [2];

4) отверждение многослойной конструкции. Для повышения качества изделия отверждение ведут в специальных условиях с использованием технологического оборудования, например, в автоклаве при повышенной температуре и избыточном давлении, или в вакуумном мешке [3];

5) снятие изделия с оправки после отверждения, обрезка припуска, контроль и т.д.

Ежегодно растет потребление композитов в машиностроительном производстве. Быстрый рост требует значительного снижения трудоемкости процесса изготовления и уменьшения производственного цикла. С этой целью разрабатываются различные решения, которые позволяют автоматизировать этапы технологического процесса.

Так, например, для сокращения основного времени изготовления изделий очень часто используют предварительно пропитанные армирующие материалы (препреги). Применение препрегов позволяет отказаться от этапа 2) и использовать материалы, как полуфабрикаты в виде лент или рулонов. С точки зрения форм-фактора пре-

преги представляют собой ленту или рулон упрочняющего материала, защищенного с одной стороны технологической подложкой. При изготовлении изделий с использованием препрегов производят послойную сборку заготовок, или намотку ленты на оправку до требуемой толщины, и отверждают конструкцию при повышенной температуре и давлении [4]. Препреги хранят при низких температурах в промышленных холодильниках и размораживают перед использованием, поэтому в этих условиях полимеризация не происходит.

Еще одно важное направление – это автоматизация этапа 3). Существует множество видов автоматизированной намотки. Наматывают как ленты из препрегов, так и материалы, пропитанные непосредственно перед применением, например, через ванну со связующим; разработаны различные модификации – намотка с прикаткой и т. д.

В последнее время получили особенное развитие различные роботизированные комплексы по выкладке. Основная идея состоит в том, чтобы выполнять этап 3), используя контактную роликовую головку, которая перемещается с помощью роботизированной «руки» по сложной поверхности формообразующей оправки. Выкладочная головка оснащается различными системами для более качественной выкладки без остановок: инфракрасным нагревателем, автоматическим резаком и т. д.

Недостатками таких комплексов являются:

1) жесткий ролик не позволяет осуществлять выкладку профилей, имеющих малые радиусы гибов, выступы и поднутрения;

2) для предотвращения прилипания к ролику материала его необходимо прикапывать через технологическую подложку. Открепление подложки от материала после прикатки может приводить к отклеиванию материала от оправки;

3) для того, чтобы при выкладке материал хорошо прилипал к оправке (на которую нанесен антиадгезионный состав), его приходится подогревать. При этом усиливается неблагоприятный эффект, описанный в предыдущем пункте;

4) необходима сложная кинематика.

Инновационное решение авторов статьи состоит в применении горячей направленной струи из форсунки при выкладке в качестве бесконтактного средства, замещающего ролик и позволяющего обойти перечисленные недостатки.

Цель работы – разработка оригинального технологического метода и технологической оснастки, позволяющих повысить стабильность качественных характеристик и снизить трудоемкость изготовления многослойных изделий переменного сечения из полимерных композиционных материалов.

Научная новизна исследования состоит в выявлении закономерностей выполнения и управления технологическим процессом изготовления композиционных изделий переменного сечения.

Практическая значимость исследования заключается в предложении оригинального технологического метода изготовления композиционных изделий переменного сечения, разработке методик управления характеристиками метода и технологической отработки конструкции регулируемых изделий переменного сечения.

Внедрение результатов исследования позволит расширить возможности по применению современных композиционных материалов при изготовлении элементов пространственно сложной геометрической формы. Реализация технологического метода при изготовлении изделий переменного сечения из полимерных композиционных материалов позволит:

1. Снизить в 1,5...5,0 раз трудоемкость изготовления композиционных изделий переменного сечения за счет автоматизации процесса послойной выкладки, по сравнению с ручной сборкой.

2. Увеличить качество, стабильность качественных характеристик композиционных изделий переменного сечения.

3. Сократить длительность технологического процесса изготовления композиционных изделий переменного сечения в 2...5 раз за счет эффективного управления технологическими режимами.

4. Уменьшить на 15...20% производственные расходы за счет сокращения но-

менклатуры применяемой технологической оснастки по сравнению с аналогами.

5. Снизить вредное воздействие на исполнителей токсичных компонентов полимерных композиционных материалов.

Расчет основных конструктивных элементов производится по оригинальной методике, позволяющей последовательно выявлять основные параметры проектируемой оснастки, обеспечивающей заданные технологические режимы.

В соответствии с методикой на первом этапе производится расчет площади поперечного сечения сопла форсунки с учетом ее конструктивных особенностей. Конфигурация форсунки определяется шириной используемой при нанесении ленты упрочняющего материала. Конструкция разработанного прототипа позволяет устанавливать форсунки различного типоразмера, обеспечивающие нанесение ленты с шириной от 10 до 50 мм, в зависимости от сложности профиля будущего изделия. Расчетным является случай с форсункой под максимальную ширину ленты. В рассматриваемом случае выбрана форсунка из нержавеющей стали, имеющая 22 отверстия диаметром 0,9 мм, с рабочей температурой до 400°C, образующая плоскую струю.

Площадь поперечного сечения сопла форсунки с учетом ее конструктивных особенностей, м²:

$$A = n\pi r^2, \quad (1)$$

где n – количество отверстий в форсунке; r – радиус отверстия в форсунке.

На втором этапе рассчитывается расход сжатого воздуха через сопло форсунки, используя соотношение [5]:

$$m = CA\rho\sqrt{\left(\frac{kM}{ZRT}\right)\left(\frac{2}{k+1}\right)^{(k+1)/(k-1)}, \quad (2)$$

где m – массовый расход газа; C – поправочный коэффициент по пропускной способности сопла; A – площадь сечения сопла; ρ – абсолютное давление газа перед соплом; k – коэффициент; M – молекулярная масса; Z – коэффициент сжимаемости;

R – константа идеального газа; T – температура газа перед соплом.

Исходя из соотношения (2), расход сжатого воздуха при направленном воздействии струей на пропитанный полимерным связующим упрочняющий материал зависит от требуемого давления направленной струи, температуры прогрева, а также площади поперечного сечения сопла.

Объемный расход сжатого воздуха, м³/ч:

$$V = \frac{m}{\rho} \cdot 3600, \quad (3)$$

где ρ – плотность воздуха.

На третьем этапе определяется требуемая производительность внешнего источника сжатого воздуха, л/мин:

$$P = \frac{m}{\rho} \cdot 1000 \cdot 60. \quad (4)$$

На четвертом этапе определяется максимальная мощность нагревателя. Для этого используется соотношение:

$$N = \frac{V\rho c\Delta T}{3600}, \quad (5)$$

где N – максимальная мощность электронагревателя; c – удельная массовая теплоемкость воздуха; ΔT – изменение температуры.

На пятом этапе производится выбор электронагревателя. Исходя из условий энергоэффективности и безопасной работы, в качестве нагревателя сжатого воздуха может быть выбран электронагреватель меньшей мощности, чем полученной в результате расчета. При этом достижение заданной температуры нагрева сжатого воздуха должно обеспечиваться соответствующей регулировкой его расхода. Поэтому прототип оснащен терморегулятором с обратной связью и бесступенчатым регулятором давления.

Прототип, реализующий оригинальную технологию бесконтактной выкладки изделий из полимерных композиционных материалов, состоит из следующих основных конструктивных элементов: форсунки 1, привода 6 вращения оправки и привода 2

продольного перемещения каретки, и предназначен для осуществления регулируемого послойного нанесения предварительно пропитанного полимерным связующим упрочняющего волокна на поверхность формообразующей оснастки с применением горячей направленной струи воздуха из форсунки [6].

Прототип содержит закрепленные на основании 4 стойки 5. На одной из стоек смонтирован привод с валом, на который с помощью трехкулачкового самоцентрирующего патрона и заднего центра устанавливается формообразующая оправка.

Прототип оснащен кареткой 3, продольное перемещение которой вдоль направляющих осуществляется специальным приводом. На каретке с возможностью горизонтального настроечного перемещения установлена воздушная форсунка, которая соединена воздухопроводом и шлангом 10 с выходом внешнего источника сжатого воздуха.

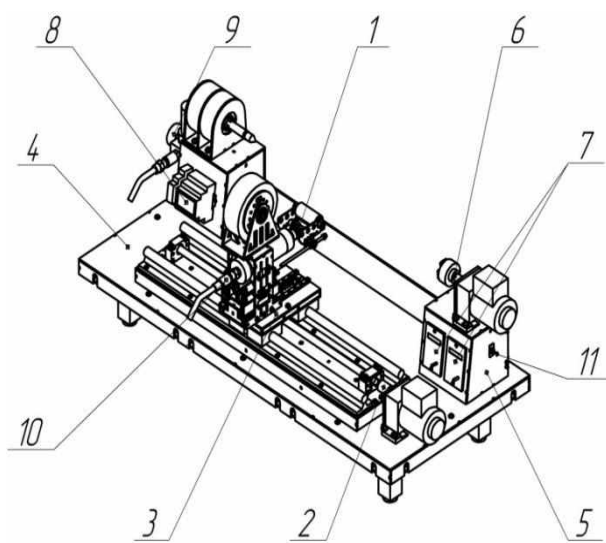


Рис. 1

На рис. 1 представлен общий вид прототипа, где 1 – форсунка в сборе с нагревателем, 2 – привод продольного перемещения каретки, 3 – каретка, 4 – основание, 5 – стойки, 6 – привод вращения формообразующей оправки, 7 – контроллеры приводов, 8 – терморегулятор с обратной связью, 9 – регулятор давления с манометром, 10 – шланг, 11 – тумблер.

Эффективная работа прототипа обеспечивается своевременным регулированием технологических режимов по давлению, температуре направленной струи воздуха из сопла форсунки, которое осуществляется с панели терморегулятора 8, и регулятором давления 9. Настройка взаимосвязанных параметров работы приводов вращения и продольного перемещения каретки осуществляется с использованием контроллеров 7.

Представленная выше методика расчета основных конструктивных элементов прототипа оборудования, состоящая из 5 этапов, позволяет последовательно рассчитывать основные параметры оснастки, обеспечивающие заданные технологические режимы. Методика универсальная и может быть использована при расчете линейки оборудования для бесконтактной выкладки изделий с требуемыми для заказчика показателями.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ignatov A.V., Subkhankulov R.M. (2021, February). Developing a technology for the automated manufacturing of composite products with a variable cross-section. In AIP Conference Proceedings. – 2021. Vol. 2318, № 1. P. 150034). AIP Publishing LLC.
2. Слюсарь Б.Н., Флек М.Б., Гольдберг Е.С., Рождественская Н.В., Шевцов С.Н. Технология вертолетостроения: Технология производства лопастей вертолетов и авиационных конструкций из полимерных композиционных материалов // Scientific magazine Kontsep. – 2013.
3. Ren F., Yu Y., Cao M., Li Y., Xin C., & He, Y. Effect of pneumatic spreading on impregnation and fiber fracture of continuous fiber-reinforced thermoplastic composites. Journal of Reinforced Plastics and Composites. – 2017. 36(21). 1554...1563.
4. Ignatov A., Subkhankulov R. (2019). Eco-friendly technology of manufacturing complex products made of composites. In E3S Web of Conferences. – 2019. Vol.140. P. 02004). EDP Sciences.
5. Kang C., Shi Y., Yu T., Zhao P., Deng B., Chen Z., Zhang H. Experimental investigation of friction between prepreg tape and compaction roller for prepreg tape hoop winding // Journal of Reinforced Plastics and Composites. – 2018. 37(12). 853...862.
6. Субханкулов Р.М., Игнатов А.В. Разработка классификации полимерных изделий переменного сечения // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2018, №12. С. 531...536.

REFERENCES

1. Ignatov A.V., Subkhankulov R.M. (2021, February). Developing a technology for the automated manufacturing of composite products with a variable cross-section. In AIP Conference Proceedings. – 2021. Vol.2318, № 1. P. 150034). AIP Publishing LLC.

2. Slyusar B.N., Flek M.B., Goldberg E.S., Rozhdestvenskaya N.V., Shevtsov S.N. Helicopter technology: Technology for the production of helicopter blades and aircraft structures from polymer composite materials // Scientific magazine Kontsep. – 2013.

3. Ren F., Yu Y., Cao M., Li Y., Xin C., & He, Y. Effect of pneumatic spreading on impregnation and fiber fracture of continuous fiber-reinforced thermoplastic composites. Journal of Reinforced Plastics and Composites. – 2017. 36(21). 1554...1563.

4. Ignatov A., Subkhankulov R. (2019). Eco-friendly technology of manufacturing complex products made of composites. In E3S Web of Conferences. – 2019. Vol.140. P. 02004). EDP Sciences.

5. Kang C., Shi Y., Yu T., Zhao P., Deng B., Chen Z., Zhang H. Experimental investigation of friction between prepreg tape and compaction roller for prepreg tape hoop winding // Journal of Reinforced Plastics and Composites. – 2018. 37(12). 853...862.

6. Subkhankulov R.M., Ignatov A.V. Development of the classification of polymer products of variable cross section // Assembly in mechanical engineering, instrument making. – 2018, № 12. P. 531...536.

Поступила 01.08.22.
