

Получение сверхлегкого армирующего материала на основе углеродного ровинга

Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ»

Рассмотрены основные методы и проблемы получения сверхлегкого армирующего материала на основе углеродного волокна. Проанализированы и определены возможные способы изготовления данного типа армирующего материала. Была определена общая компоновка установки, проведен анализ и предварительный расчет. При проектировании установки решались газодинамическая (методом конечных элементов) и силовая (аналитически) задачи. На основании полученных результатов были разработаны основные узлы, определены производственные параметры установки. Спроектированная установка была сконструирована и реализована в реальном производстве.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, сверхлегкий армирующий материал, композит, углерод, углеродный ровинг, углерод-материал.

Одной из основных проблем при производстве летательных аппаратов в общем и их узлов в частности является выбор материалов. Несмотря на кажущееся разнообразие материалов, их широкую номенклатуру, достаточно тяжело подобрать материалы, которые одновременно удовлетворяли бы конструкционным, технологическим и эксплуатационным требованиям. К сожалению, армирующих материалов, которые удовлетворяли бы таким требованиям, – на сегодняшний день ограниченная номенклатура и ограниченные объемы производства. Кроме того, такие материалы имеют высокую стоимость погонного метра или же вообще не производятся современной промышленностью (таблица) [1, 2].

Таким образом, возникает задача производства сверхлегкого армирующего материала (до 40 г/м²). Проанализировав пути решения данной проблемы на различных предприятиях [1, 2], занимающихся производством сверхлегкого прочного армирующего материала, было принято решение разработать установку и методику получения сверхлегкого углеродного материала (углеродного ровинга) на основе углеродного ровинга.

Основные производители сверхлегкого углеродного материала

Производитель	Марка	Плотность, г/м ²	Стоимость, €/м ²
Охеон АВ (Швеция)	TeXtreme	38	82
Harmoni Co (Япония)	Harmoni	42	85

Особенно остро эта проблема стоит тогда когда выдвигаются особые требования к летательным аппаратам, а именно когда при малых размерах обеспечить требуемые прочностные, геометрические и массовые характеристики. Такая проблема возникает при проектировании сверхлегких беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) (авиамоделей, планеры и др.) (рис. 1).

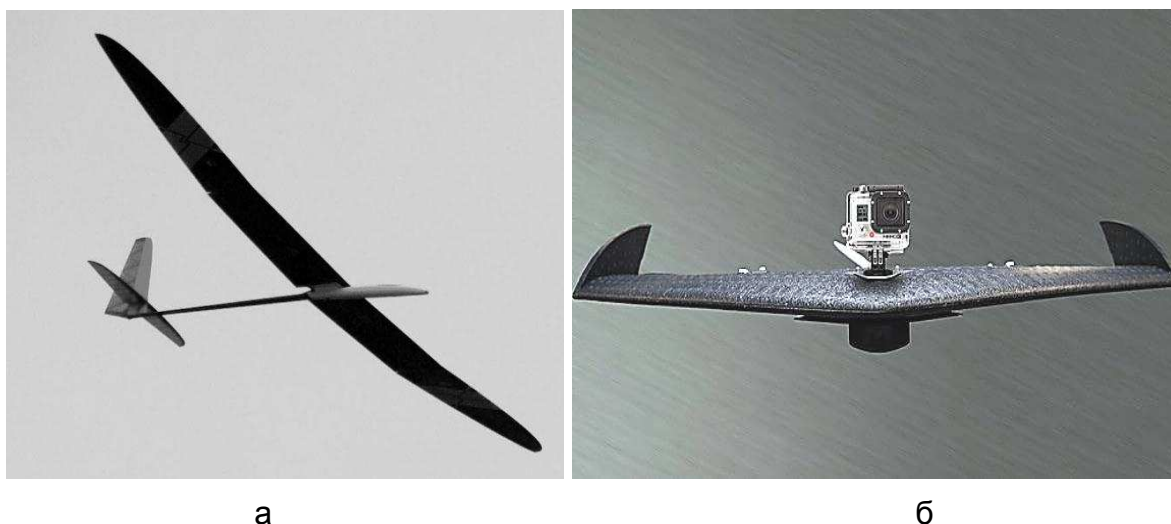


Рис. 1. Микро беспилотные летательные аппараты:
 а – радиоуправляемый планер Маха F3J (Vladimir's Model); б – БПЛА для фото- и видеосъемки Lehmann LA100 (Lehmann Aviation)

Основным принципом, на котором должна базироваться работа установки для производства легкого армирующего материала, является разделение некрученого углеровинга на элементарные углеволокна и преобразование их в однонаправленную углеленту путем так называемой раскатки [3 – 5]. Схематично установка представлена на рис. 2.

На основании схемы (см. рис. 2) были проведены расчеты данной установки. Расчет силовой рамы заключался в выборе стандартных профилей, способных выдержать нагрузку, создаваемую оборудованием, которое крепится к раме, а также расчет болтовых и сварных соединений по известным методикам расчета. Параметры профилей определялись из условий прочности, устойчивости, а также обеспечения жесткости конструкции.

Расчет параметров тракта протяжки материала сводился к решению двух задач, а именно: газодинамической и силовой. В газодинамической задаче определялась скорость потока воздуха и давление, необходимое для преобразования углеровинга в углеленту, а также нахождение потребной мощности компрессора. Кроме того, решение газодинамической задачи дает возможность определить количество участков в тракте [6]. При решении силовой задачи искомыми параметрами являются потребная сила натяжения, линейная скорость движения углематериала в тракте, а также параметры двигателя.

В газодинамической задаче потребный поток воздуха является функцией от площади поперечного сечения моноволокон, его толщины, а также наличия замасливателя на поверхности волокон:

$$Q = f(S, d, M) . \quad (1)$$

Определение потока аналитическим методом связано с определенными трудностями, поэтому расчет был проведен методом конечных элементов (рис. 3) в пакете ANSYS.

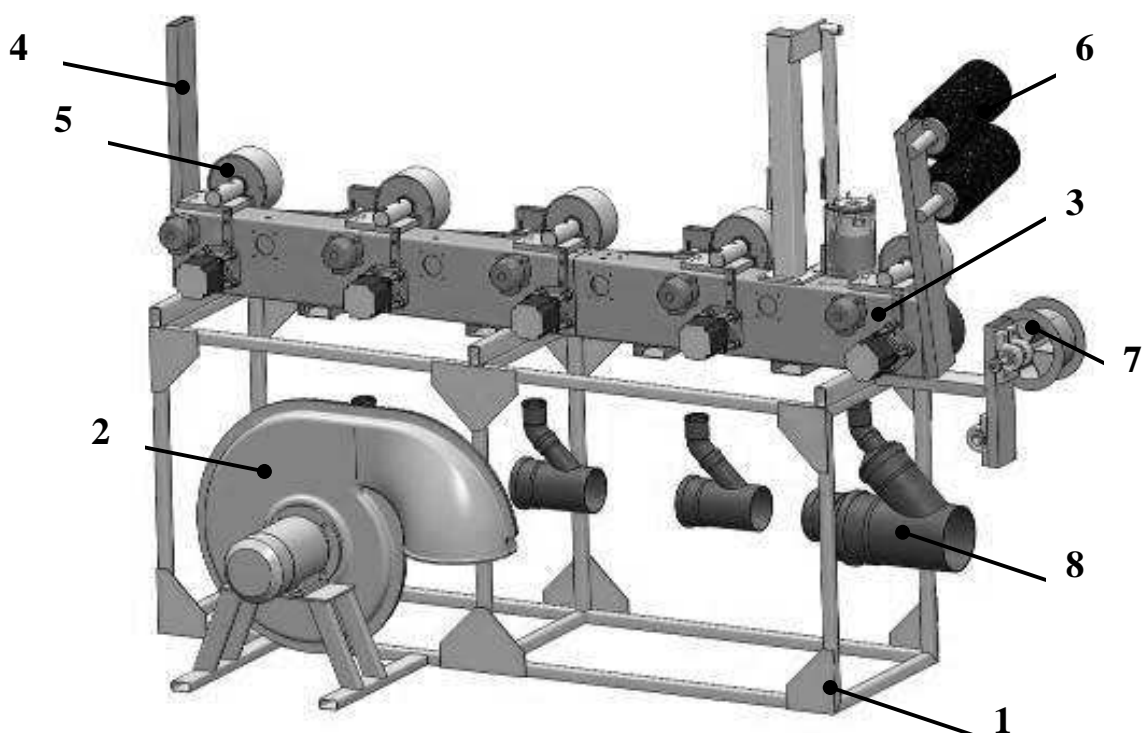


Рис. 2. Схема установки для получения спред-материала:
 1 – силовая рама; 2 – компрессор с электродвигателем; 3 – тракт протяжки ленты;
 4 – система выпрямителей; 5 – тянущие валки; 6 – бобина с углеровингом;
 7 – приемная бобина углеленты; 8 – воздухопроводы

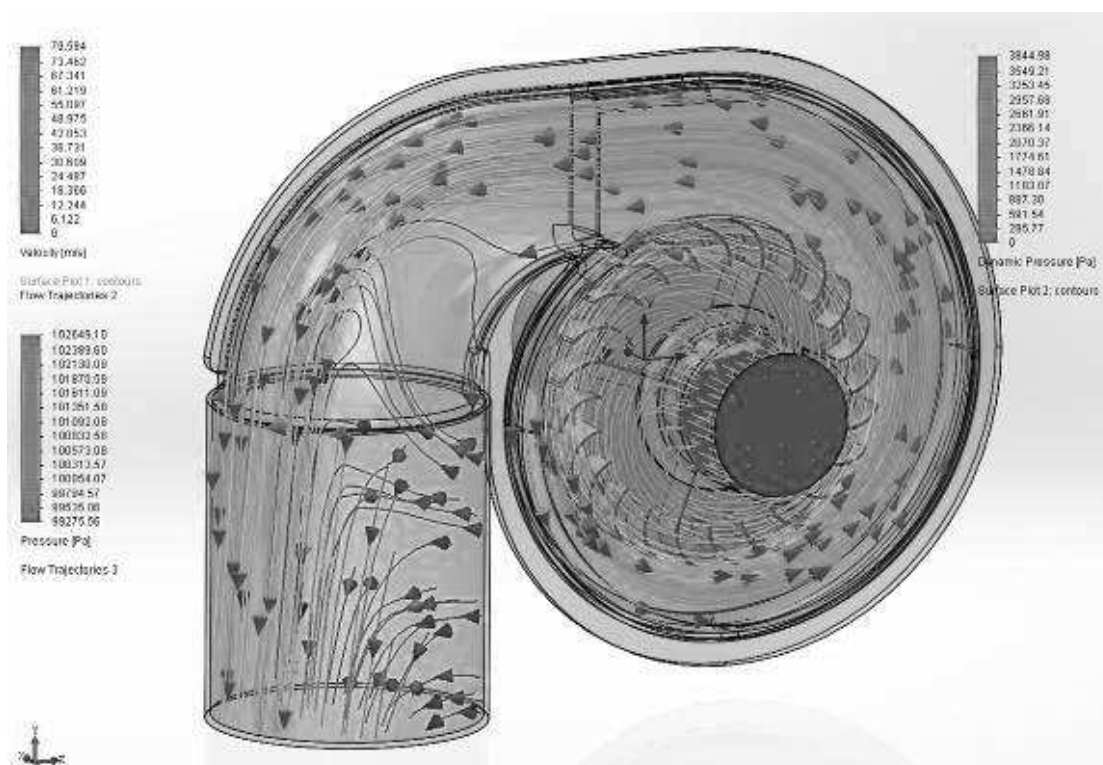


Рис. 3. Распределение потока воздуха в компрессоре

При расчете потока, проходящего через один диффузор, в первом приближении было получено, что будет создаваться избыточное давление не менее 0,15 МПа. Однако при таком давлении усилие, действующее на моноволокно, будет больше предельного значения, следовательно, одного сопла для преобразования ровинга в ленту недостаточно, так как не выполняется условие прочности моноволокна. Методом итерации было определено, что количество сопел должно быть не менее четырех. Поток воздуха в каждом сопле является функцией от площади и вида поперечного сечения материала. Таким образом, для первого сопла скорость потока будет равна 78 м/с, для второго – 75 м/с, для третьего – 72 м/с, для четвертого – 69 м/с. Однако для реализации такого конструктивного решения необходимо наличие четырех независимых компрессоров, что в свою очередь несколько усложняет конструктивное выполнение установки и управление процессом. Поскольку разница значений между максимальным и минимальным значениями скорости потоков составляет чуть более 10 %, было принято решение во всех четырех соплах создать поток со скоростью 73 м/с при избыточном давлении 0,08 МПа. Данное значение для каждого участка не превышает предельно допустимого из условия разрушения волокна.

Для обеспечения полученных значений давления и скорости потока воздуха были определены параметры компрессора.

В процессе получения углеленты неизбежными будут потери углематериала (ломаные волокна), которые необходимо удалять. Ломаные волокна удаляются через сопла потоком воздуха от компрессора и по воздуховодам поступают в специальную емкость. Отбраковка материала происходит на каждом участке тракта, благодаря чему обеспечиваются регламентированные параметры углеленты, повышается качество материала.

Второй этап проектирования установки заключался в решении силовой задачи. Решением данной задачи является определение параметров тракта протяжки углематериала: силы натяжения материала, линейной скорости протяжки ленты в тракте, угловой скорости вращения и частота вращения барабанов, а также параметры двигателя.

Потребное натяжение углематериала определяется из условия прочности материала, а также из условия обеспечения равномерного натяжения материала в тракте. Потребное натяжение в тракте можно определить следующим образом:

$$N_H = 0.05...0.1 \cdot N_p , \quad (2)$$

где N_H – усилие натяжения;

N_p – разрывная нагрузка.

Усилие натяжения в тракте, как видно из (2), зависит от разрывной нагрузки материала, но не является постоянной величиной для всего тракта, а может быть описано кусочно-непрерывной функцией. Это связано с тем, что после прохождения каждого участка тракта между барабанами происходит уменьшение поперечного сечения углематериала, обусловленного неизбежной отбраковкой и удалением отдельных волокон материала. Следовательно, для определения усилия натяжения в тракте для каждого участка можно воспользоваться зависимостью

$$N_p = 0.05...0.1 \cdot \sigma_b \cdot F_0, \quad (3)$$

где σ_b – предел прочности материала;

F_0 – площадь поперечного сечения углематериала.

Опытным путем установлено, что на первом участке тракта происходит отбраковка не более 5 % углеволокон, на втором – 5 %, на третьем – 10 %, на четвертом (конечном) – 10 %. Следовательно, в таких же соотношениях будет уменьшаться и разрывная нагрузка для углематериала для каждого участка. Тогда зависимость (2) можно представить в виде

$$\{N_{Hi}\} = 0.05...0.1 \cdot N_p \cdot \{k_i\}, \quad (4)$$

где $\{N_{Hi}\}$ – усилия натяжения на i -м участке тракта;

$\{k_i\}$ – безразмерные коэффициенты, соответствующие i -м участкам тракта, в данном случае принимают следующие значения: $\{k_i\} = \{0,95; 0,95; 0,9; 0,9\}$.

Тогда значения усилия натяжения $\{N_{Hi}\}$ для каждого участка будут равны: для первого – 182 Н; для второго – 173 Н; для третьего – 168 Н; для четвертого – 158 Н.

Разница между коэффициентами $\{k_i\}$ и усилиями натяжения $\{N_{Hi}\}$ для каждого участка составляет около 10 %, кроме того, конструктивно обеспечить различное натяжение достаточно сложно, поэтому для реализации конструкции принимается единый коэффициент, равный 0,9. Тогда зависимость (4) можно преобразовать к следующему виду:

$$N_H = 0.045...0.09 \cdot N_p. \quad (5)$$

Усилие натяжения в тракте будет равно 178 Н.

Для обеспечения потребного натяжения материала в тракте необходимо, чтобы скорость движения ленты обеспечивала данное усилие натяжения. Потребную скорость протяжки в тракте можно определить, решив дифференциальное уравнение

$$N_H - F_{mp} = m \frac{\partial v}{\partial t}, \quad (6)$$

где F_{mp} – сила трения углеленты в тракте, Н;

m – масса ленты, протянутой за определенное время, кг;

t – время движения ленты в тракте, мин.

Следует отметить, что скорость протяжки будет зависеть от параметров исходного материала, замасливателя, покрытия тянущих валков, значит, полученное значение необходимо корректировать в процессе производства.

Тогда угловая скорость вращения барабанов определяется известной зависимостью

$$\omega = \frac{v}{R}, \quad (7)$$

где R – радиус барабана, который определяется из конструктивных соображений и общей компоновки, м.

Приведенные зависимости и модели, а также полученные результаты в полной мере отображают физику процесса и были взяты за основу при проектировании тракта по производству однонаправленной углеродной ленты.

Представленная выше методика расчетов и полученные на ее основании результаты позволили сконструировать установку для получения однонаправленного материала на производстве (рис. 4).

Конструктивно установка представляет собой силовую раму, к которой крепятся основные элементы. Принятое на этапе проектирования решение максимально стандартизировать элементы конструкции привело к снижению затрат, связанных с изготовлением установки, кроме того, существенно сокращает затраты на эксплуатацию и ремонт.

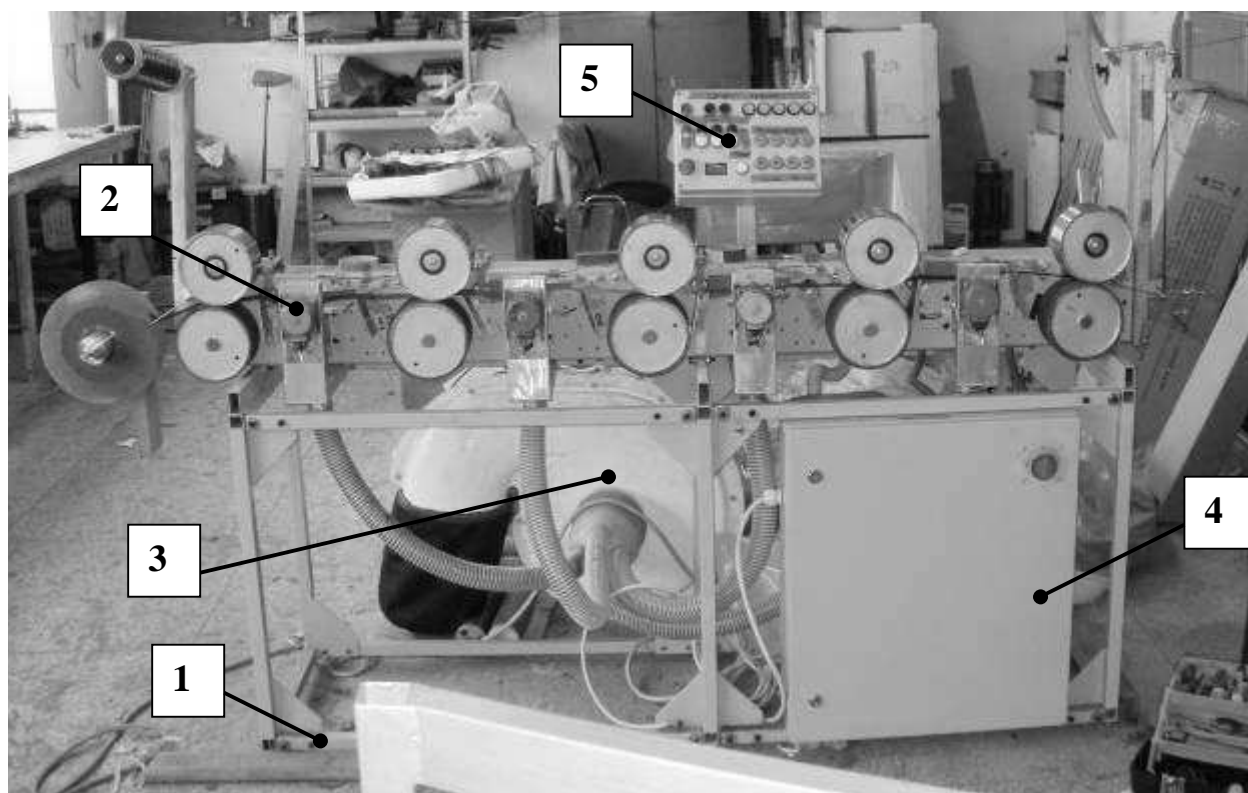


Рис. 4. Установка для получения углеродной ленты: 1 – силовая рама; 2 – тракт протяжки; 3 – компрессор; 4 – блок питания; 5 – блок управления

Управление процессом протяжки осуществляется через блок управления. Реализованный алгоритм позволяет изменять технологические характеристики процесса (скорость протяжки, поток воздуха в достаточно широком диапазоне), что обусловлено возможным применением ровингов на основе стекло- и органоволокон, а также ровингов на основе волокон с широким диапазоном толщин моноволокон. При разработке алгоритма управления процессом ставились следующие задачи: реализация заданных параметров процесса получения материала с учетом возможностей оборудования; простота управления процессом.

Таким образом, спроектированная и реализованная в производстве установка позволяет получать углеродный материал с высокими удельными характеристиками при малой толщине (рис. 5), что особенно важно для обеспечения точности геометрии изделий.

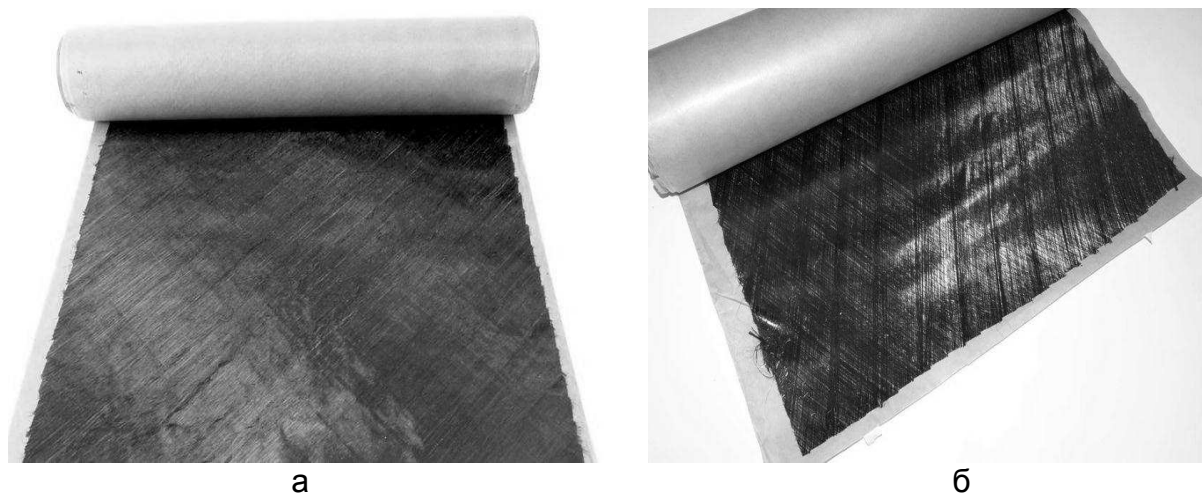


Рис. 5 Полученные образцы: а – однонаправленный материал (угол укладки +45°); б – биаксиальный материал ($\pm 45^\circ$)

Производительность установки составляет 200 м/ч, а это позволяет получать при необходимости до 800 м однонаправленного углематериала в день. Такие показатели производительности полностью удовлетворяют потребность в материале для малого производства сверхлегких беспилотных летательных аппаратов. Кроме того, полученный однонаправленный материал можно преобразовать в би-, три- и мультиаксиальный материалы с заданным углом армирования. Внедрение данной установки и технологического процесса получения данного материала позволило исключить зависимость от поставок требуемого материала, повысить производительность, а также снизить себестоимость изделий приблизительно на 30 – 40 %.

Список литературы

1. HARMONI INDUSTRY CO.,LTD. [Электронный ресурс] / Single-tow Spreading Machine FK-2. – Режим доступа: <http://www.harmoni.co.jp/02/products/single.html>
2. Oxeon AB [Электронный ресурс] / TeXtreme®. – Режим доступа: <http://www.oxeon.se/index.php?page=extreme>
3. Khokar, N. Advancements in Spreading Fiber Tows and Weaving High Performance - Low Weight Fabrics / Khokar, N., Ohisson, F. // Proceedings of the 27th International SAMPE Conference. Paris, - 2006. – P. 284.
4. Пат. 2462542 РФ, МПК D02J1/18 (2006.01), D01D11/02 (2006.01). Способ расправления углеродного жгута и установка для его осуществления / Кепман А. В. (RU), Малахо А. П. (RU), Занегин Ю. А. (RU), Лонгуэрас Джорди Галан (ES) и др. – 2010152740/12, 23.12.2010; опубл. 27.09.2012.
5. Пат. 2435877 РФ, МПК D02J1/18 (2006.01), D01F9/12 (2006.01). Установка для расправления углеродного жгута / Кепман А. В. (RU), Малахо А. П. (RU), Занегин Ю. А. (RU), Лонгуэрас Джорди Галан (ES) и др. – 2011107129/12, 25.02.2011; опубл. 10.12.2011.
6. Сергель, О. С. Прикладная гидрогазодинамика : учеб. для авиац. вузов [Текст] / О. С. Сергель. – М. : Машиностроение, 1981. – 374 с.

Рецензент: д-р. техн. наук, проф. В. Е. Гадайчук, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.
Поступила в редакцию 04.12.2013

Отримання надлегкого армуючого матеріалу на основі вуглецевого ровінга

Розглянуто основні методи й проблеми отримання надлегкого армуючого матеріалу на основі вуглецевого волокна. Проаналізовано й визначено можливі способи виготовлення певного типу армуючого матеріалу. Було визначено загальну компоновку, проведено аналіз і попередній розрахунок. Під час проектування установки розв'язувалися газодинамічна (методом скінченних елементів) і силова (аналітично) задачі. За отриманими результатами було розроблено основні вузли, визначено виробничі параметри установки. Спроектвану установку було сконструйовано й реалізовано в реальному виробництві.

Ключові слова: безпілотний літальний апарат, надлегкий армуючий матеріал, композит, вуглестрічка, ровінг, спред-матеріал.

The manufacturing of ultra-light reinforcing material made of carbon roving

The main methods and problems of manufacturing of spread-tow carbon fiber were considered. The possible ways of manufacturing of this reinforced material were analyzed and defined. The general arrangement of equipment was defined. The preliminary calculation and analysis of equipment was done. During the designing of equipment the gas-dynamic the problem was solved by the finite-elements method and the problem of forces determination was solved analytically. Based on obtained the main units were designed and manufacturing parameters of equipment were defined. The designing solutions of equipment were implemented in the real manufacturing.

Keywords: Unmanned vehicle, ultra-light reinforced material, composite, carbon tape, roving, spread-tow material.