

УДК 539.319:678.027.94

Канд. техн. наук А. В. Чесноков

Восточноукраинский национальный университет им. В. Даля, г. Луганск

## РАЗРАБОТКА И АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ УГЛЕПЛАСТИКОВЫХ СТЕРЖНЕЙ НА УГЛЕВОДСОДЕРЖАЮЩЕМ СВЯЗУЮЩЕМ

*В работе предложен способ интенсификации процесса изготовления углерод-углеродно-го материала для сопловых насадок ракетных двигателей. Проведен анализ особенностей изготовления углепластиковых стержней на углеводсодержащем связующем для армирующих каркасов. Определены технологические этапы изготовления и требования к узлам пултрузионной установки изготовления стержней. Приведенный анализ энергопотребления при формовании позволил предложить нагрев полуфабриката пропусканием электрического тока по нему между фильерами. Предложена схема установки и реализован ее лабораторный аналог. Результаты исследований, проведенных на лабораторной установке, подтвердили правильность выбранных методов реализации процесса.*

**Ракетный двигатель, сопловый насадок, армирующий каркас, стержень, пултрузия, углевод**

### Введение

Благодаря уникальным свойствам углерод-углеродные композиционные материалы (УУКМ) перспективны для применения в конструкциях сопловых насадков космических ракетных двигателей. Эти материалы эффективно работают в высокоскоростных окислительных газовых потоках при высоких температурах в сопле жидкостного и твердотопливного ракетного двигателя.

Улучшение качества УУКМ ведется за счет оптимизации распределения армирующего волокна в заданных направлениях с максимальным использованием его характеристик и повышением качества углеродной матрицы, основными параметрами которой является структура углерода и пористость. Наиболее полное использование потенциала углеродных волокон реализуется в стержневых армирующих каркасах, благодаря равномерности распределения армирующих волокон и сохранению их целостности и прямолинейности. Создание углеродной матрицы эффективно осуществлять термоградиентным газофазным методом, так как он наиболее производительный и полученный материал имеет высокие характеристики. Для насыщения углеродом матрицы армирующий каркас должен обладать хорошей газопроницаемостью, поэтому известный способ [1] производства армирующих каркасов, собранных из стержней, полученных на поливиниловом спирте (ПВС) за счет высокой поверхностной плотности стержней и в результате слабой газопроницаемости, не позволяет получить материал с низкой пористостью. В работе [2] предложено изготавливать стержни на углеводсодержащем

связующем, которое имеет после отверждения хорошие механические характеристики и может быть удалено из структуры после сборки каркаса.

Для изготовления композиционных материалов в качестве связующего углеводсодержащие растворы до настоящего времени не применялись. В силу ряда особенностей, как водного раствора углевода, так и самого углевода после испарения воды, существующие технологические процессы изготовления стержневых волокнистых полимерных материалов без проведения дополнительных исследований не могут быть использованы. Для повышения конкурентоспособности материала необходимо уделить внимание применению энергосберегающих технологий, высокой производительности и безопасности технологического процесса производства стержней.

### Формирование технологического процесса изготовления стержней

Анализ литературы, посвященной вопросам переработки армирующих материалов и патентный поиск, показали, что наиболее широко при изготовлении стержней и профильных изделий из волокнистых однонаправленных материалов используется метод пултрузии. Аналогом проектируемого процесса является изготовление углепластиковых стержней на ПВС связующем.

Проанализируем технологические особенности углеводсодержащего связующего и самого углевода  $C_{12}H_{22}O_{11}$ . Углевод хорошо растворяется в воде, вязкость раствора зависит от концентрации углевода и температуры. Для выполнения технологического процесса необходимо создать такую его концентрацию, чтобы раствор

был не вязкий с минимальным содержанием воды, так как ее необходимо удалять при изготовлении стержней. Анализ характеристик раствора при различных температурах позволяет рекомендовать соотношение углеводов: вода 4:1, при температуре 60–80 °С. Такой раствор имеет невысокую вязкость и достаточно технологичен при переработке. Особенности раствора является резкое повышение вязкости при охлаждении и кристаллизация углевода из раствора, поэтому необходимо предусмотреть поддержание температуры полуфабриката и контактирующих поверхностей не ниже рекомендованной на ранних стадиях технологической линии и повышение температуры по мере удаления воды, а также постоянное перемешивание раствора в пропитывающем устройстве. Температура плавления углевода 185–186 °С, поэтому на завершающих стадиях изготовления должна быть температура не ниже указанной.

Сформулируем стадии переработки материала и требования к узлам установки. Нанесение связующего должно осуществляться без повреждения волокна, например, «купающимся» роликом, при этом связующее должно постоянно циркулировать и не иметь застойных зон для исключения кристаллизации раствора. Для ограничения количества связующего в полуфабрикате необходимо предусмотреть отжим излишков связующего, температура фильеры не ниже температуры связующего. Стадия интенсивного удаления воды из полуфабриката с минимальными затратами энергии и разогрев полуфабриката до температуры формования. Формование обжати́ем полуфабриката в фильере при температуре не менее 190 °С и охлаждение сформованного стержня на воздухе. В качестве тянущего устройства для снижения повреждаемости стержня рационально использовать приводную бобину [3].

Определить оптимальное количество связующего, которое должно быть в стержне, расчетным путем сложно из-за большого количества допущений, связанных с формой и расположением филамент, условиями проникновения связующего и т.д. Основная нагрузка на стержень при сборке сжимающая, поэтому важно качественно сформовать поверхностные слои стержня. Необходимо стремиться получить максимальную устойчивость стержня при минимальном его диаметре. Увеличение диаметра стержня приводит к резкому увеличению нагрузок на стержень при сборке [4]. Диаметр стержня определяется формующей фильерой. Сечение отжимной фильеры должно быть больше формующей на содержание воды в наносимом растворе.

Для определения рационального способа термообработки рассчитаем количество энергии, необходимое для разогрева волокна и удаления влаги.

Расчет произведем для стержня, полученного в три сложения жгута УКН-5000, количество связующего в стержне примем равным количеству ПВС в аналогичных стержнях.

Затраты энергии на нагрев жгутов, связующего и испарение влаги определим по формуле:

$$Q = c_{\text{в}} m_{\text{в}} (t_1 - t_0) + (c_{\text{у}} m_{\text{у}} + c_{\text{жс}} m_{\text{жс}}) (t_2 - t_0) + \lambda m_{\text{в}},$$

где  $c_{\text{в}}$ ,  $c_{\text{у}}$ ,  $c_{\text{жс}}$  — теплоемкость, соответственно, воды, углевода и жгута;

$m_{\text{в}}$ ,  $m_{\text{у}}$ ,  $m_{\text{жс}}$  — масса, соответственно, воды, углевода и жгута;

$t_0$ ,  $t_1$ ,  $t_2$  — температуры, соответственно, исходная, парообразования и формования;

$\lambda$  — теплота парообразования воды.

Расчет по приведенной зависимости дает приближенный результат, так как не учитываются внешние факторы теплопередачи, но рассчитанные затраты энергии  $Q = 930$  Дж позволяют определить точку отсчета при выборе метода термообработки.

Наиболее экономично вести разогрев непосредственно жгута. Углеродный жгут используют в нагревательных устройствах за счет его электропроводности. Рассчитаем возможность использования сопротивления жгутов для нагрева. При использовании в качестве контактов фильер, расположенных на расстоянии 1 м, при скорости движения полуфабриката 2 м/мин необходимо, чтобы мощность нагрева составила 31 кВт. Измеренное сопротивление трех жгутов УКН-5000 составляет 21 Ом/м, следовательно, достаточно пропускать ток по жгутам около 28 В. Полученное напряжение для термообработки является безопасным и может быть применено в технологической линии.

Схема установки представлена на рис. 1. Подогрев ванночки со связующим осуществляется нагревательными элементами, с постоянным контролем температуры. Нагрев полуфабриката изменяется варьированием напряжения, подводимого к фильерам. Для отвода влаги из камеры предусмотрена циркуляция нагретого воздуха.

#### Анализ экспериментальных данных

Для подтверждения работоспособности предложенной схемы установки были проведены эксперименты на созданной лабораторной установке, которая по функциональности соответствует предложенной. При изготовлении опытной партии стержней были отмечены особенности процесса, проанализируем основные из них.

Углеводсодержащий раствор хорошо наносится на жгуты купающимся роликом, вязкость раствора не отличается от водного раствора ПВС. Для качественного отжима связующего необходим предварительный подогрев фильеры, в противном

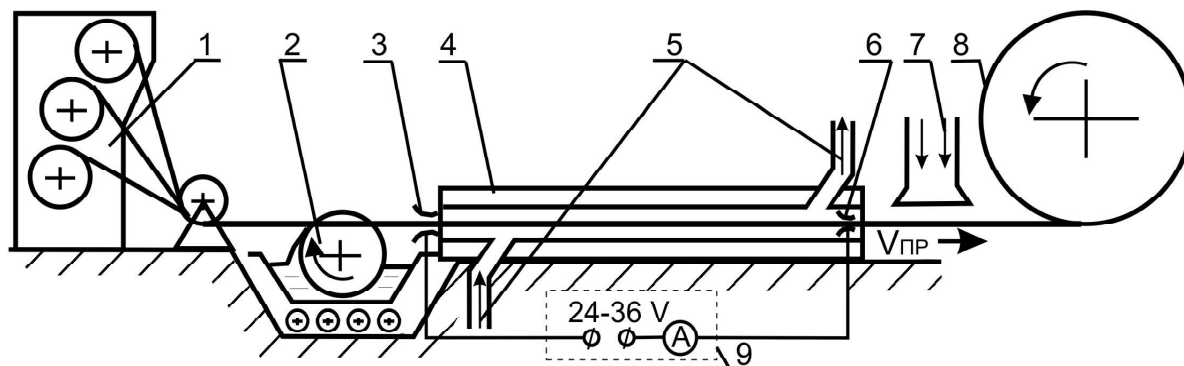


Рис. 1. Схема установки изготовления стержней на углеводсодержащем связующем:

1 – шпулярник; 2 – пропитка; 3 – фильера отжима; 4 – камера сушки; 5 – подача и отвод нагретого воздуха; 6 – фильера формования; 7 – охлаждение; 8 – протяжка; 9 – нагрев полуфабриката

случае происходит увеличение вязкости связующего, приводящее к повреждению волокон и остановке процесса.

Процесс нагрева полуфабриката пропусканием через него электрического тока протекал стабильно, зафиксированное колебание силы тока не превышало 5 %. Электрическое сопротивление пропитанного полуфабриката существенно не отличается от сопротивления сухих волокон, но условия контакта жгутов и фильер увеличивает сопротивление. Измеренное сопротивление цепи, фильера – 1 м полуфабриката – фильера, составило 24 Ом. Повышение напряжения до 30 В позволило получить заданный температурный режим.

При формовании фильерой  $\varnothing 1,16$  мм получены стержни  $\varnothing 1,16^{+0,04}_{-0,02}$  мм, что соответствует требованиям к стержням для автоматической сборки каркасов.

Полученные образцы стержней прочнее аналогов на ПВС-связующем и имеют характерный хрупкий излом, что повышает их технологичность при сборке армирующих каркасов.

При изготовлении стержней на опытной установке имели место остановки процесса по причине заклинивания полуфабриката в формирующей фильере, что свидетельствует о нарушении температурного режима. Причиной нарушения температурного режима была нестабильность скорости и температуры потока горячего воздуха, изменение контактных сопротивлений фильера-волокну и др.

Установка для серийного изготовления стержней должна быть оборудована датчиками контроля всех технологических параметров для повышения стабильности процесса.

Необходимо проведение дополнительных экспериментов для подбора соотношения диамет-

ров фильер, скорости протяжки и температур на всех стадиях изготовления с целью стабильного получения стержня с максимальной относительной устойчивостью.

#### Выводы

Анализ особенностей изготовления волокнистых композиционных материалов на углеводсодержащем связующем позволил определить этапы выполнения операции и требования к оборудованию, его реализующему. Предложен и обоснован способ термообработки полуфабриката пропусканием электрического тока через жгуты, полученное значение напряжения для термообработки является безопасным. Предложенная схема установки изготовления стержней имеет в сто раз ниже энергопотребление на термообработку и выше производительность по сравнению с аналогичной для изготовления стержней на ПВС связующем. Результаты изготовления опытной партии стержней на лабораторной установке подтвердили работоспособность предложенной схемы изготовления стержней. Для повышения производительности и стабильности изготовления стержней определены задачи дальнейших исследований.

#### Перечень ссылок

1. Чесноков А. В. Технологический процесс изготовления углепластиковых стержней для углерод-углеродных композитов / А. В. Чесноков // Вісн. Східноукраїнського нац. ун-ту ім. В. Даля. – №7 (53). – Луганськ, 2002. – С. 143–148.
2. Чесноков А. В. Перспективы улучшения качества углерод-углеродных композиционных материалов / [А. В. Чесноков, А. В. Гайдучук, А. М. Потапов, И. В. Гурин]. // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – Х. : НАКУ «КХАІ». – 2008. – Вип. 6 (53). – С. 51–54.

3. Чесноков А. В. Изготовление стержневых армирующих каркасов для углерод-углеродных композиционных материалов на основе «бесконечного» стержня / А. В. Чесноков // Проектирование та виробництва конструкцій літальних апаратів : збірн. наук. прац. — Вип. 1 (52). — Х., 2008. — С. 104–107.
4. Чесноков А. В. Силовой анализ укладки слоев горизонтальных стержней при сборке армирующих каркасов / А. В. Чесноков // Проектирование та виробництва конструкцій літальних апаратів : збірн. наук. прац. — Вип. 2 (53). — Х., 2008. — С. 82–86.

Поступила в редакцию 08.10.2009

**A. V. Chesnokov**

### **DEVELOPMENT AND ANALYSIS OF PRODUCTION PROCESS OF CARBOHYDRATE-BOUND CARBON-PLASTIC RODS**

*У роботі запропоновано спосіб інтенсифікації процесу виготовлення вуглець-вуглецевого матеріалу для соплових насадок ракетних двигунів. Проведений аналіз особливостей виготовлення вуглепластикових стержнів на сполучному, що містить вуглевод, для армируючих каркасів. Визначені технологічні етапи виготовлення і вимоги до вузлів пултрузійної установки виготовлення стержнів. Приведений аналіз енергоспоживання при формуванні дозволив запропонувати нагрів напівфабрикату пропусканням електричного струму по ньому між фільтрами. Запропонована схема установки і реалізований її лабораторний аналог. Результати досліджень, проведених на лабораторній установці, підтвердили правильність вибраних методів реалізації процесу.*

**Ракетний двигун, сопловий насадок, армуючий каркас, стержень, пултрузія, вуглевод**

*There is proposed intensification method of production process of carbon-carbon material for nozzles of rocket engines. There is performed analysis of peculiarities of production of carbohydrate-bound carbon-plastic rods for reinforcing frameworks. There determined stages of production process and requirements to assembly units of pultrusion plant for production of rods. Represented analysis of power consumption during formation process allows to offer heating of intermediate product by electric current passed between extrusion nozzles. There is proposed installation diagram and realized its laboratory analogue. Results of investigation, performed at the laboratory facility, have confirmed correctness of the chosen methods of production process.*

**Rocket engine, nozzle, reinforcing framework, bar, pultrusion, carbohydrate**