

Технология получения нетканого полотна сверхнизкой поверхностной плотности

П.Л. ЛЮДОГОВСКИЙ,

канд. техн. наук,

Н.А. СЕМИН,

аспирант,

Р.Р. АХМЕТШАРИПОВ,

А.Р. КОВТУНОВА,

бакалавр

(КНИТУ-КАИ, Казань)

plludogovsky@kai.ru

Разработана технология получения нетканого полотна сверхнизкой поверхностной плотности с использованием установки для расправления углеродных волокон на основе комбинированного механико-вакуумного воздействия, включающего шахматное расположение нагревательных валов и использование вакуумных узлов распушевания, обеспечивающее равномерное раскрытие жгута, с исключением термического повреждения волокон. Достигнуты более высокая однородность распределения волокон и повышенная структурная стабильность полотна по сравнению с существующими аналогами.

Нетканое полотно, сверхнизкая поверхностная плотность, ровинг, расправление волокон, вакуумное распушевание, композиционные материалы

Приоритетным направлением совершенствования авиационно-космической техники является снижение массы конструкций при одновременном обеспечении высоких показателей прочности и эксплуатационной надежности. В данном контексте перспективным представляется использование полимерных композиционных материалов, армированных текстильными структурами, включая ткани, трикотаж и нетканые полотна. Особый научно-технический интерес вызывают нетканые материалы, что обусловлено их низкой поверхностной плотностью и потенциалом для адаптивного проектирования структуры армирующего наполнителя [1–3].

Качество и эксплуатационные свойства полимерных композиционных материалов во многом зависят от равномерности распределения волокон в армирующем слое, именно поэтому при производстве нетканых полотен актуальна задача обеспечения равномерного расправления жгутов ровинга с минимальным повреждением волокон и снижением энергозатрат [4–6]. Традиционные технологии, основанные на пневматическом воздействии горячим воздухом, характеризуются повышенным энергопотреблением, сложностью регулирования воздушного потока и риском термического повреждения волокон.

Одним из ключевых параметров при оценке качества нетканого полотна является поверхностная плотность, которая рассчитывается по выражению

$$\omega = \frac{m}{A},$$

где ω – поверхностная плотность, г/м²; m – масса образца, г; A – площадь образца, м².

Кроме того, при увеличении ширины полотна возрастает вероятность образования нерасправленных участков, что ухудшает однородность материала и снижает значения прочностных характеристик полимерных композиционных материалов. При этом остается нерешенной проблема точного контроля формы и равномерности потока, что приводит к неоднородности плотности и повреждению отдельных волокон [7, 8].

Таким образом, использование существующих технологий ограничивается повышенным энергопотреблением при использовании горячего воздуха, вероятностью термического повреждения волокон, недостаточной управляемостью процессом расправления и неравномерностью структуры полотна, ограниченной адаптивностью оборудования к разным типам ровинга.

В работе [9] показано, что механическое или комбинированное расправление волокон позволяет регулировать геометрию полотна. Однако при отсутствии эффективной системы распределения потока либо контроля натяжения данный метод сопряжен с риском повреждения волокон и нестабильностью технологического процесса.

В связи с этим актуальной задачей является разработка комплексного технологического решения, сочетающего преимущества механических, тепловых и пневмовакuumных методов без их характерных недостатков.

Новизна предлагаемого подхода заключается в использовании комбинированного механико-вакуумного воздействия. В отличие от существующих решений, основанных преимущественно на нагре-

том воздушном потоке, разработанная технология сочетает последовательное растяжение волокон на ведущих и ведомых валах с синхронизированным приводом, исключая проскальзывание; равномерное нагревание материала на валах, расположенных в шахматном порядке, что обеспечивает постепенное размягчение волокон; вакуумное распушевание через сотовую вставку, формирующую ламинарный поток, позволяющий контролировать форму и интенсивность воздействия на волокна.

Такое сочетание методов позволяет снизить вероятность механического и термического повреждения волокон, обеспечить равномерность распределения материала по ширине полотна и снизить энергопотребление установки.

Цель работы – создание опытного образца установки для производства нетканого полотна сверхнизкой поверхностной плотности на основе комбинированного механико-вакуумного расправления ровинга.

Задачами исследования является анализ существующих технологий расправления волокон и выявление их ограничений; проектирование и изготовление установки с комбинированными узлами растяжения, нагрева и вакуумного распушевания; оценка технологических преимуществ предложенного решения с точки зрения равномерности и энергоэффективности.

Технология изготовления нетканого полотна сверхнизкой поверхностной плотности базируется на сочетании механического растяжения волокон ровинга, их тепловой обработки и последующего вакуумного распушевания. Такое комбинированное воздействие обеспечивает равномерное раскрытие жгутов, предотвращает повреждение волокон и способствует получению материала с высокой степенью однородности.

Технологическая схема получения армирующего наполнителя из нетканого полотна сверхнизкой поверхностной плотности представлена на рис. 1.

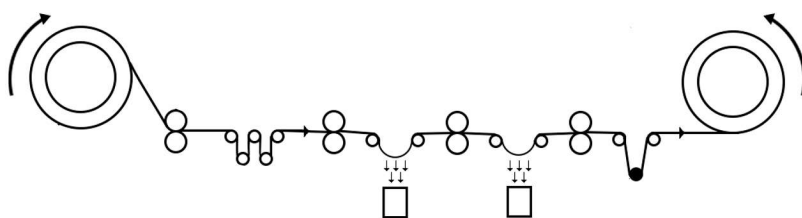


Рис. 1

Исходный материал подается с катушки и проходит через систему деформационно-растягивающих валов (рис. 2, а). На первом этапе осуществляется начальное выравнивание и распределение волокон по ширине полотна. Для предотвращения проскальзывания используется комбинация ведущего стального и ведомого резинового вала. Ведущие валы снабжены шаговыми двигателями, что обеспечивает синхронизацию скоростей и равномерность натяжения.

Следующим этапом является термическая обработка. Волокна проходят через нагревательные валы (рис. 2, б), расположенные в шахматном порядке в два уровня. Такая конфигурация обеспечивает равномерный прогрев и исключает локальный перегрев материала. Нагрев способствует снижению жесткости волокон и облегчает их последующее расправление.

После термообработки материал проходит через узлы вакуумного распушевания (рис. 3, а). В отличие от известных решений, где используется поток горячего воздуха, в предлагаемой технологии использован вакуумный отсос. Для формирования ламинарного потока используется труба с сотовой вставкой, аналогичной элементам аэродинамических труб. Такая конструкция позволяет равномерно втягивать волокна, контролировать их пространственное положение и добиваться качественного раскрытия жгута без избыточного воздействия температуры. Возможность изменения геометрических параметров трубы позволяет адаптировать установку к работе с различными типами ровингов.

Следующая стадия включает установку дополнительного растягивающего вала, который стабилизирует натяжение полотна после распушевания, а также обеспечивает окончательное выравнивание волокон. Контроль натяжения осуществляется посредством тензометрического узла (рис. 3, б): используется вал повышенной массы, положение которого отслеживается оптическим датчиком. В зависимости от положения вала система сама регулирует скорость намотки на приемную катушку. Это предотвращает образование складок или избыточного натяжения.

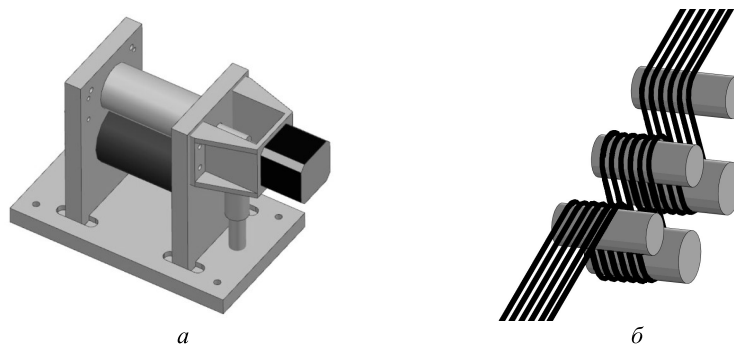


Рис. 2

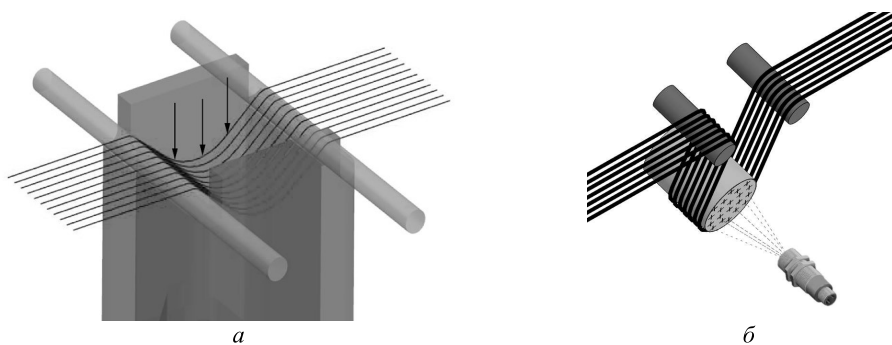


Рис. 3

Заключительным этапом является формирование готового полотна и его намотка на приемную катушку. Благодаря комплексному воздействию механического, теплового и вакуумного узлов получаемое полотно характеризуется стабильной структурой, сниженной плотностью и отсутствием дефектов, связанных с перегревом или неравномерным распределением.

Эффективность процесса расправления оценивается через коэффициент спредирования:

$$K_s = \frac{b_r}{b_{и}},$$

где b_r – ширина жгута после спредирования; $b_{и}$ – исходная ширина жгута.

Предложенная установка решает задачу повышения качества и стабильности нетканого полотна при одновременном снижении энергозатрат. Научная и практическая значимость разработки заключается в создании адаптивной технологии, которая может быть использована для изготовления армирующих наполнителей в полимерных композиционных материалах авиационного и космического назначения.

Экспериментальная оценка подтвердила, что ключевым преимуществом разработанной установки является более высокая равномерность распределения волокон по сравнению с известными решениями, основанными исключительно на механическом растяжении или термическом воздействии горячим воздухом. Совмещение стадий растяжения, нагрева и вакуумного распушевания в одной технологической линии позволяет значительно снизить вероятность образования сгустков и нерасправленных участков, а также уменьшить поверхностную плотность готового полотна. Ключевым технологическим элементом является применение вакуумного распушевания посредством сотовой вставки, обеспечивающего ламинарный режим воздушного потока. Такой подход принципиально отличает разработанную установку от традиционных решений, где применяется турбулентный поток горячего воздуха. В результате удастся исключить термическое повреждение волокон, что особенно важно для серийного производства. Кроме того, применение равномерно распределенного всасывающего потока позволило увеличить степень раскрытия жгута, что непосредственно влияет на стабильность характеристик исходного полотна.

Результаты экспериментальных испытаний подтверждают корректность функционирования разработанной установки. При различных режимах подачи и нагрева удалось сохранить стабильность полотна,

при этом система тензометрического контроля обеспечивала поддержание натяжения в пределах 2 % отклонения от заданного значения. Благодаря этому достигается высокая повторяемость эксплуатационных характеристик, что ранее являлось одной из ключевых проблем в аналогичных технологиях. Сравнительный анализ с зарубежными и российскими аналогами выявил ряд преимуществ предложенного технологического решения. Разработанная установка характеризуется универсальностью по отношению к различным типам ровингов, обеспечивает повышенную равномерность распределения волокнистого материала, позволяет снизить энергопотребление за счет исключения интенсивного нагрева воздушным потоком, а также демонстрирует более высокую эксплуатационную надежность, обусловленную простотой конструкции и ее ремонтпригодностью. В отличие от аналогов, где наблюдаются проблемы перегрева и частичного разрушения волокна, в разработанной установке данные недостатки устранены за счет мягкого вакуумного воздействия и контролируемого нагрева.

Результаты работы демонстрируют перспективность применения разработанной установки для производства армирующих наполнителей полимерных композитов авиационного и космического назначения, где критически важны низкая масса, стабильность структуры и эксплуатационные свойства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Проводящий слой молниезащитного покрытия для полимерных композитов: пат. 2764853 Рос. Федерация, № 2021114888; заявл. 26.05.2021; опубл. 21.01.2022, Бюл. № 3.
2. Людоговский П.Л. и др. Реализация технологии вакуумного формования в производстве тонкостенных высокотемпературных радиопрозрачных композиционных изделий // Изв. вузов. Авиационная техника. 2025. № 2. С. 173–178.
3. Коваль А.П., Бобарика И.О. Моделирование системы подачи связующего вещества в процессе вакуумной инфузии композитной панели // Изв. вузов. Авиационная техника. 2024. № 3. С. 197–202.
4. Установка для расправления углеродного жгута: пат. 2435877 Рос. Федерация, № 2011107129/12; заявл. 25.02.2011; опубл. 10.12.2011, Бюл. № 34.
5. Способ расправления углеродного жгута и установка для его осуществления: пат. 2462542 Рос. Федерация, № 2010152740/12; заявл. 23.12.2010; опубл. 27.09.2012, Бюл. № 27.
6. Константинов Д.Ю. и др. Исследование несущей способности композитных конструкций в зоне отверстия при различных схемах армирования // Изв. вузов. Авиационная техника. 2024. № 1. С. 154–163.
7. Эластичный многослойный материал и способ изготовления эластичного многослойного материала: пат. 2620747 Рос. Федерация, № 2015129703; заявл. 21.12.2012; опубл. 29.05.2017, Бюл. № 16.
8. Способ расправления некрученого волокна и установка для его осуществления: пат. 2471900 Рос. Федерация, № 2011153040/12; заявл. 26.12.2011; опубл. 10.01.2013, Бюл. № 1.
9. Кудинов В.В., Корнеева Н.В., Крылов И.К. Влияние компонентов на свойства полимерных композиционных материалов. М.: Наука, 2021. 134 с.

Поступила в редакцию 19.01.26

После доработки 26.01.26

Принята к публикации 30.01.26

Technology for Manufacturing an Ultra-Low Areal Density Nonwoven Web

P.L. LYUDOGOVSKII, N.A. SEMIN, R.R. AKHMETSHARIPOV,
AND A.R. KOVTUNOVA

Tupolev Kazan National Research Technical University, Kazan

A technology for producing an ultra-low areal density nonwoven web was developed using an installation for spreading carbon fibers based on combined mechanical-vacuum treatment, including a staggered arrangement of heating rollers and the use of vacuum garnetting units, which ensure uniform opening of the tow while eliminating thermal damage to the fibers. Improved uniformity of fiber distribution and enhanced stability of the web structure have been achieved in comparison with known analogs.

Nonwoven web, ultra-low areal density, roving, fiber spreading, vacuum garnetting, composite materials