

УДК 678.5

УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПУЛТРУЗИИ

Андриасян Д. А., студент гр. ХТб-231, III курс,
Научный руководитель: Третьяков В.Н., к.т.н., доцент
Кузбасский государственный технический университет
имени Т.Ф. Горбачева
г. Кемерово

Полимерные композитные материалы (ПКМ) представляют собой систему, состоящую из нескольких элементов, в которой армирующие волокно распределено в полимерной матрице [1]. Подобная система обеспечивает комплекс уникальных свойств: высокие значения удельной прочности и жесткости, устойчивость к коррозионным воздействиям, длительный ресурс в агрессивных средах, а так же значительно меньший вес по сравнению с традиционными материалами – сталью, алюминием, сплавами, бетонам, что обуславливает их устойчивое конкурентное преимущество и активное внедрение в новые различные отрасли промышленности [2].

Мировая статистика фиксирует устойчивый прирост потребления полимерных композиционных материалов на уровне 5–7 % ежегодно. Наибольший спрос на данные материалы формируется со стороны авиастроительной, автомобильной, ветроэнергетической отраслей, а также строительного комплекса [3]. Российский рынок композитов демонстрирует положительную динамику с годовым приростом около 3–4 %, причем основными потребителями выступают дорожно-строительная сфера, нефтегазовый сектор и транспортное машиностроение. Крупными секторами применения композитных материалов в России также являются судостроение, железнодорожное машиностроение, производство спортивного оборудования и товаров народного потребления, а также оборонно-промышленный комплекс [1]. В условиях действующей политики импортозамещения и реализации масштабных инвестиций в данный сектор экономики развиваются множество масштабных проектов, одним из которых является запуск в Республике Мордовия производства пултрузионных профилей, а также развитие мощностей в ОЭЗ «Алабуга», создается прочная база для устойчивого развития отечественной композитной индустрии и укрепления ее технологического суверенитета.

Наиболее устойчивое замещение традиционных материалов (металлов, бетона, древесины) наблюдается в следующих секторах экономики:

Строительная отрасль: использование стеклопластиковой арматуры, пултрузионных профилей для мостовых переходов, пешеходных галерей, шумозащитных экранов;

Нефтегазовый комплекс: внедрение насосно-компрессорных труб, напорных трубопроводов, резервуарного оборудования;

Транспортное машиностроение: изготовление элементов интерьера и экстерьера автомобилей, корпусов судов различного назначения;

Энергетический сектор: производство лопастей ветрогенераторов, защитных кожухов фотоэлектрических панелей.

Современная промышленность использует несколько технологий формованию изделий из полимерных композитов:

Пултрузия - непрерывное вытягивание пропитанного связующим волокнистого наполнителя через формующий инструмент с последующим отверждением [4].

Намотка - послойное наложение пропитанных волокон на вращающуюся оправку [5].

Вакуумная инфузия - удаление воздуха из слоев сухого армирующего материала с последующей пропиткой связующим под вакуумом [2].

Прямое прессование - одновременное воздействие давления и температуры на заготовку из волокон и связующего [5].

Инжекционное формование - впрыск жидкого связующего в замкнутую форму, содержащую сухой армирующий наполнитель [2].

Выбор конкретной технологии определяется геометрическими особенностями продукции, требуемыми эксплуатационными показателями и экономической целесообразностью. Каждая из перечисленных технологий обладает собственными достоинствами и ограничениями, а получаемые с ее помощью изделия зачастую являются уникальными и не могут быть воспроизведены с использованием других технологий в связи с инфраструктурными особенностями.

Наиболее значимый экономический и эксплуатационный эффект достигается при использовании пултрузионных профилей. Это связано с уникальными достоинствами данных изделий: практически полное отсутствие отходов производства, высокая размерная точность, исключающая необходимость финишной механической обработки, возможность получения профилей неограниченной длины, высокий уровень автоматизации, позволяющий реализовать непрерывный режим работы, ориентация волокон вдоль оси изделия, обеспечивающая максимальные прочностные характеристики в продольном направлении [4, 3].

Наряду с перечисленными преимуществами, пултрузионный метод имеет ряд технологических ограничений, которые необходимо учитывать при проектировании изделий и выборе способа их изготовления. Это, во первых, значительная продолжительность циклов нагрева и охлаждения при использовании термореактивных связующих, что снижает производительность и увеличивает энергозатраты, во вторых, повышенная чувствительность к качеству исходных компонентов (волокон, связующих, технологических добавок), отклонения в которых приводят к образованию дефектов, в третьих, высокая стоимость специализированного оборудования и необходимость привлечения квалифицированного обслуживающего персонала, и наконец в четвертых, ограниченный диапазон совместимых пар (армирующее волокно – полимер-

ная матрица), что сужает возможности варьирования свойств конечного изделия [5, 2].

При этом комплекс эксплуатационных свойств и качество композитов, полученных пултрузией, определяется совокупностью факторов, среди которых ключевое значение имеют: природа и состояние армирующих волокон, характеристики полимерной матрицы, объемное содержание наполнителя, температурно-временные режимы отверждения, скоростной режим вытяжки [1, 6].

Однако одной из главных проблем является отсутствие возможности проведения исследований, связанных с внедрением новых видов сырья или изменением технологических параметров процесса, т.к. это влечет за собой большие финансовые издержки, связанные с использованием промышленного оборудования. Использование промышленной линии для проведения исследований влияния различных параметров на эксплуатационные свойства пултрузионных изделий приводит к перерасходу дорогостоящего сырья и может привести к поломке дорогостоящего оборудования. Лабораторное оборудование для проведения подобных исследований отсутствует.

В связи с этим была сконструирована и изготовлена лабораторная установка для исследования процесса пултрузии, которая представлена на рисунках 1 - 4.

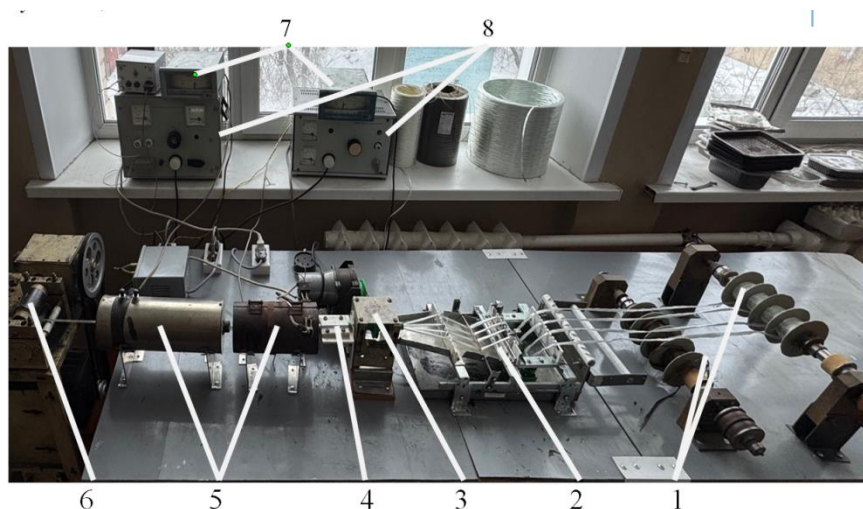


Рисунок 1 – Внешний вид лабораторной установки для исследования процесса пултрузии:

1 – устройство подачи волокна; 2 – узел пропитки волокна полимерным связующим; 3 – узел скручивания волокна; 4 – узел формования профиля изделия; 5 – узел нагрева (2 зоны обогрева); 6 – тянущий блок; 7 - контрольно-измерительные блоки; 8 – блоки регулирования мощности обогрева.

Волокнистый наполнитель предварительно наматывается на катушки узла подачи волокна 1, в котором предусмотрено два блока по четыре катушки в каждом. Блоки предназначены для разных по природе наполнителей, например стеклянного и базальтового или углеродного, что дает возможность

получать готовое изделие с разным сочетанием наполнителей. Количество нитей ровинга, которое идет на производства пластика от 1 до 4.

Заданное количество нитей далее направляется в узел пропитки волокна полимерным связующим, представленным на рисунке 2. Пройдя через направляющую гребенку 2 и валок 3, волокно попадает в емкость 4, заполненную полимерным связующим. Волокно пропитывается смолой и направляется на отжимные валки 5, где происходит удаление излишков смолы, которые попадают на лоток 6 и по нему возвращаются назад в емкость 4. Степень отжима и соответственно содержание полимерного связующего в готовом изделии регулируется траекторией движения волокна через отжимные валки, чем

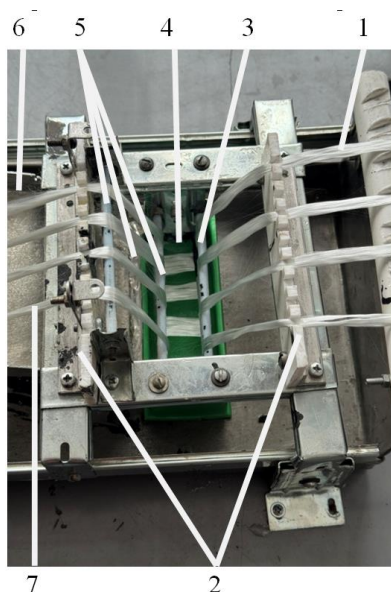


Рисунок 2 – Узел пропитки волокна полимерным связующим

1 – сухое волокно; 2 – направляющие гребенки; 3 – валок; 4 – емкость для связующего; 5 – отжимные валки; 6 – лоток для сбора отжатого связующего; 7 – пропитанное волокно.

больше обхватывается валков, тем сильнее отжим.

Пропитанные и отжатые волокна попадают на вторую направляющую гребенку 2 и далее поступают в узел скручивания волокна, представленный на рисунке 3. Узел состоит из двух опорных плит 3, в которых на двух радиальных подшипниках закрепляется полый вал 1. На валу установлен шкив 2, крутящий момент на который передается с помощью ременной передачи от электродвигателя 4 через редуктор 5 и шкив привода 6. Частота вращения вала составляет 4,8 об/мин.

Во внутреннее отверстие вала подаются волокна, пропитанные связующим. Отверстие имеет продольные проточки для лучшего сцепления с волокном. При вращении вала волокна начинают скручиваться между собой в единый жгут и уплотняются.

К скучивающему устройству со стороны выхода крепиться консоль узла формования 7, на которую устанавливается формующая плита 8.

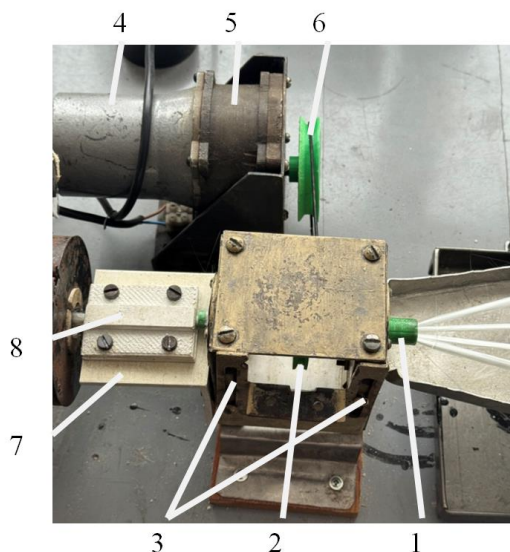


Рисунок 3 – Узлы скручивания волокна и формования профиля готового изделия:

1 – полый вращающийся вал; 2 – шкив скручивающего устройства; 3. опорные плиты; 4 - электродвигатель; 5 – редуктор; 6 – шкив привода; 7 – консоль узла формования; 8 – формующая плита.

Скрученное уплотненное волокно далее подает в формовочный канал, образованный консолью 7 и формовочной плитой 8. Канал имеет переменное сечение: на входе 6х6 мм, на выходе – 4х4 мм, длина 60 мм, последние 20 мм сечение не изменяется и составляет 4х4 мм. За счет уменьшения сечения происходит окончательное уплотнение жгута и придание ему заданной формы. Установка позволяет изменять профиль формуемого изделия за счет замены формующей плиты.

Далее жгут волокон проходит через узел нагрева, состоящий из двух печей канального типа. Печи имеют самостоятельные блоки регулирования мощности обогрева 8 (рисунок 1) и контрольно-измерительные блоки 7 (рисунок 1). Такая конструкция позволяет более точно поддерживать необходимую температуру печи и обеспечивать плавный переход от одной зоны терпирования к другой. Температура может быть установлена в диапазоне от 25 °С до 300 °С.

Протягивание волокна через все узлы установки осуществляется тянущим блоком 6 (рисунок 1), детальное устройство которого представлено на рисунке 4.

Протягивание изделия происходит за счет двух валков – ведущего 4 и прижимного 6. Ведущий вал установлен на подшипниках в опорных плитах 9. Прижимной вал прижимается к ведущему с помощью пружин, расположенных в пазах подвижных опор прижимного вала 8. Крутящий момент на ве-

дущий вал передается от электродвигателя постоянного тока 1 через клиноременную передачу 2, шкив 3 и редуктор 5. Частота вращения двигателя регулируется с помощью ЛАТРа 7.

Тянущий механизм обеспечивает диапазон скоростей протяжки от 10 до 24 см/мин.

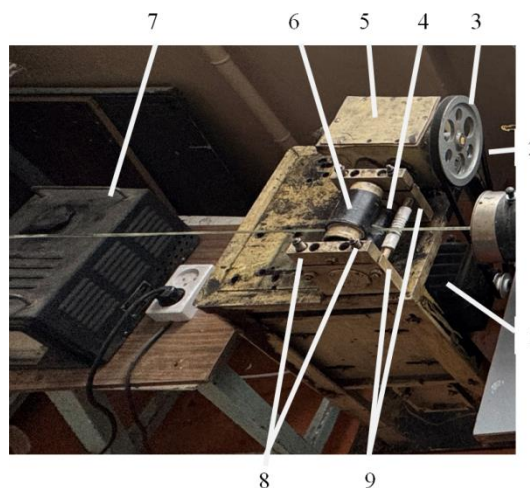


Рисунок 4 – Тянущий блок:

1 – электродвигатель постоянного тока; 2 – клиноременная передача; 3 – шкив редуктора; 4 – ведущий валок; 5 – редуктор; 6 – прижимной вал; 7 – ЛАТР; 8 – подвижная опора прижимного вала; 9 – опорные плиты ведущего вала.

Первичные испытания установки проводились с использованием стеклянного ровинга (4 нити) и эпоксидного связующего, содержащего эпоксидную смолу (ЭД-20), отвердитель (изо МТГФА) и ускоритель отверждения (агидол). Изготавливались образцы в виде стержней прямоугольного сечения с размерами 4х4 мм при следующем режиме: $T_1=180^{\circ}\text{C}$, $T_2=200^{\circ}\text{C}$, $V_{\text{протяжки}} = 21 \text{ см/мин}$.

Для полученных образцов были определены деформационно-прочностные характеристики при растяжении (ГОСТ 11262-2017) и при изгибе (ГОСТ 4648-2014) и содержание наполнителя. Последний показатель определялся методом отжига связующего ($T=800^{\circ}\text{C}$, $\tau=1 \text{ ч}$). Полученные результаты представлены в таблице.

Как видно свойства изделия, полученного на установке, соответствуют диапазону изменения свойств стеклопластиков по литературным данным. Это указывает на то, что данную установку можно использовать для проведения исследований процесса пултрузии.

Таблица – Результаты испытаний образцов, полученных на установке для исследования процесса пултрузии

Материал	Содержание наполнителя, %	Растяжение (ГОСТ 11262-2017)				Изгиб (ГОСТ 4648-2014)			
		Прочность при растяжении, МПа	Прочность при разрыве, МПа	Относительное удлинение при максимальной нагрузке, %	Относительное удлинение при разрыве, %	Модуль упругости при изгибе, МПа	Прочность при изгибе, МПа	Напряжение изгиба при разрыве, МПа	Относительное удлинение при разрыве на изгибе, %
Стеклопластик пултрузионный (опытный)	53,3	478,3	347	8,2	9,1	2669	309	187,5	7,1
Стеклопластик* [7]	-	до 1000	до 800	-	-	до 10000	до 1000	до 10000	-

* - зависит от многих факторов (состава, условий получения и др.).

Список литературы

1. Каблов, Е. Н. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технологии / Е. Н. Каблов, В. О. Старцев, В. К. Крылов. – Москва : ВИАМ, 2018. – 320 с. – ISBN 978-5-905217-18-6.
2. Михайлин, Ю. А. Конструкционные полимерные композиты : учебник / Ю. А. Михайлин. – 2-е изд., перераб. и доп. – Санкт-Петербург : НИУ ИТМО, 2020. – 280 с. – ISBN 978-5-7577-0625-6.
3. Справочник по композиционным материалам : в 2 т. / под ред. Дж. Любина ; пер. с англ. под ред. Б. А. Злобина. – Москва : Машиностроение, 2020. – Т. 1. – 448 с. – ISBN 978-5-94275-891-0.
4. ГОСТ 4648–2014. Пластмассы. Метод определения статической прочности при изгибе. – Москва : Стандартинформ, 2015. – 12 с.
5. Кербер, М. Л. Технология переработки полимерных композиционных материалов : учебное пособие / М. Л. Кербер, В. М. Виноградов, Г. С. Голов-

кин ; под ред. М. Л. Кербера. – Санкт-Петербург : Профессия, 2019. – 432 с. – ISBN 978-5-91884-089-4.

6. Пултрузионные профили из полимерных композиционных материалов : технология и применение / А. С. Баранов, И. В. Гусев, Д. С. Кузнецов // Композиты и наноструктуры. – 2022. – Т. 14, № 3. – С. 45–53.

7. Иржак В.И. Эпоксидные полимеры и композиты с эпоксидной матрицей. – М.: РАН, 2022. – с. 288.